



Universidade de Aveiro

Departamento de Engenharia Civil

2016

**Ana Margarida
Rodrigues Ferreira**

**EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO LITORAL APÓS
ALIMENTAÇÕES ARTIFICIAIS DE SEDIMENTOS**



**Ana Margarida
Rodrigues Ferreira**

**EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO LITORAL APÓS
ALIMENTAÇÕES ARTIFICIAIS DE SEDIMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Clarinda e António.

*"Um navio atracado no cais está seguro mas não é para isso que os navios
são feitos." (William Shedd)*

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira Oliveira
investigadora auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O melhor do mundo são as pessoas, são elas que tornam os momentos e os lugares especiais. Dedico este espaço a expressar o meu enorme agradecimento e reconhecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação e me acompanharam durante o meu percurso académico.

Ao Professor Carlos Coelho em primeiro lugar pela forma como me expôs o tema e dessa forma mobilizou a minha curiosidade, pela transmissão de conhecimento, por todas as ajudas, pela constante disponibilidade, por todos os esclarecimentos, por todas as correções, por todas as críticas e valiosas sugestões. Professor, tem todo o meu respeito, consideração e estima.

À Márcia Lima pelos esclarecimentos e facilidades proporcionadas na utilização do modelo numérico.

A todos os meus professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Ao Ricardo Dias e à Inês Sampaio pela enorme oportunidade que me deram ao convidarem-me para integrar as suas equipas do Núcleo de Estudantes de Engenharia Civil da Associação Académica da Universidade de Aveiro, bem como aos restantes colegas que comigo trabalharam no NEBEC. Sem dúvida que o enorme espírito de equipa e pró-atividade que existe no NEBEC contribuiu para o meu crescimento pessoal e tornou-se uma das melhores experiências da minha vida académica.

À Sara Magalhães que durante a realização deste trabalho se desdobrou em constantes palavras de incentivo.

Aos meus colegas de curso com os quais partilhei experiências fantásticas que quero recordar para o resto da vida. Definitivamente aprendi muito com eles.

Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional, pelos constantes incentivos, pela paciência colossal, mas acima de tudo por todos os sacrifícios feitos para a concretização do meu sonho, sem dúvida são o meu baluarte número um.

A toda a restante família e amigos pelo apoio e palavras de incentivo.

Muito Obrigada

palavras-chave

Alimentação artificial de sedimentos, morfologia, LTC, erosão, agitação marítima.

resumo

O litoral de Portugal revela graves problemas de erosão que se relacionam com a existência de défices sedimentares significativos. Em 2014, o GTL (Grupo de Trabalho do Litoral) definiu como principal estratégia de defesa costeira para o litoral português a reposição do balanço sedimentar, através de alimentações artificiais de sedimentos. Nesse sentido, torna-se essencial o estudo e modelação da evolução da linha de costa de forma a prever o desempenho da alimentação, servindo de suporte à definição de cenários de intervenção.

A morfologia que o litoral adquire é dependente do transporte de sedimentos que ocorre ao longo da costa. Os sedimentos são distribuídos por ação das ondas, correntes e ventos. No entanto, as características da agitação incidente são consideradas o principal agente modelador e o maior responsável pela capacidade de transporte de sedimentos. Os sedimentos podem adquirir movimentos paralelos ou perpendiculares à linha de costa. Os movimentos perpendiculares à linha de costa refletem o comportamento a curto prazo da evolução morfológica do litoral e os movimentos paralelos estão associados às alterações da linha de costa a longo termo.

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo do impacto das alimentações artificiais, como medida de defesa costeira, na evolução da morfologia do litoral. Analisou-se como ocorre a distribuição espacial e temporal dos sedimentos induzidos pela alimentação artificial de sedimentos ao longo da costa, para diferentes tipos de praia, em função das características da agitação incidente. Para tal utilizou-se o modelo numérico LTC (*Long-Term Configuration*). Assim, avaliou-se o impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca na evolução da linha de costa em planta, na geometria dos perfis transversais e nas variações de altimetria da região modelada. De forma a obter-se o impacto da alimentação artificial comparou-se a situação de evolução natural da linha de costa (sem realizar alimentação artificial) com a situação de ser realizada a adição artificial de sedimentos. Para além disso, tentou-se avaliar a velocidade de transporte do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos, de forma a antecipar o tempo de permanência das alimentações e a necessidade de proceder a novas alimentações.

O estudo realizado demonstra que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca, de um modo geral, um impacto benéfico na morfologia, atenuando efeitos negativos da erosão sobre a evolução da linha de costa, contrariando os défices sedimentares existentes. Esse impacto repercute-se na diminuição do recuo da linha de costa e no aumento da robustez do perfil transversal. Por último, a análise qualitativa do impacto da alimentação artificial de sedimentos em três troços costeiros da faixa continental portuguesa também revela o efeito benéfico da alimentação artificial de sedimentos.

keywords

Beach nourishment, morphology, LTC, erosion, maritime agitation.

abstract

The Portuguese littoral reveals serious erosion problems related with significant sedimentary deficits. In 2014, the GTL (*Grupo de Trabalho do Litoral* – Littoral Working Group) defined as the main coastal defense strategy for the Portuguese coast to mitigate the sediment budget, through artificial sand nourishment. This way, it is essential the study and modeling of the coastline evolution in order to predict the performance of the beach nourishment, serving to support the definition of intervention scenarios.

The littoral morphology is dependent on the sediment transport that occurs along the coast. The sediments are distributed by wave action, currents and winds. However, the characteristics of the incident wave action are considered the main modelling agent and the most important in sediment transport capacity. Sediments can acquire parallel or perpendicular movements to the coastline. The movements perpendicular to the coastline reflect the short-term morphological evolution of the littoral and the parallel movements are associated with long-term shoreline changes.

This work aimed to study the beach nourishment impact, as coastal intervention defense measure, in morphological evolution of the littoral. It was analyzed how occurs the spatial and temporal distribution of sediment induced by beach nourishment along the coast, to different types of beach, in function on the characteristics of the incident wave climate. For this purpose was applied the numerical model LTC (Long-Term Configuration). Hence, it was evaluated the impact of the beach nourishment in the shoreline evolution, in the cross-shore profile geometry and in the altimetry variations of the modeled area. So, to obtain the beach nourishment impact, it was compared the natural longshore evolution (without beach nourishment) with the longshore evolution after a beach nourishment. Furthermore, it was tried to evaluate the transport velocity of the gravity center of the beach nourishment, in order to anticipate the residence time of the nourishment and the need of beach renourishment. The study shows that the beach nourishment causes, in general, a beneficial impact on morphology, reducing negative effects of erosion on the coastline evolution, against the existing sedimentary deficit. This impact is reflected in decreased retreat of the shoreline and increasing the strength of the cross-shore profile. Finally, a qualitative analysis of the beach nourishment impact in three coastal stretches of the Portuguese coast also shows the beneficial effect of beach nourishment.

ÍNDICES

ÍNDICE GERAL

Índice geral.....	i
Índice de figuras	v
Índice de tabelas	xiii
Lista de símbolos.....	xv
1 Introdução	3
1.1 Enquadramento do problema.....	3
1.2 Objetivos do trabalho	5
1.3 Estrutura da dissertação	5
2 Alimentação artificial	9
2.1 Dinâmica sedimentar – processos de transporte.....	11
2.1.1 Transporte sedimentar longitudinal	11
2.1.2 Transporte sedimentar transversal	12
2.2 Locais de empréstimo	13
2.2.1 Dragagens ao largo	14
2.2.2 Dragagens em portos e canais de navegação.....	15
2.3 Locais de depósito – processos de deposição	15
2.3.1 Alimentação na zona das dunas.....	17
2.3.2 Alimentação na zona seca da praia.....	17
2.3.3 Alimentação do perfil de praia	17
2.3.4 Alimentação na zona submersa do perfil de praia.....	18
3 Modelação numérica	21
3.1 Formulação teórica do modelo numérico LTC	23
3.1.1 Transformação da onda	23
3.1.2 Transporte longitudinal de sedimentos.....	25

3.1.3	Evolução morfológica	26
3.2	Cenários modelados e considerações sobre a modelação	29
3.3	Metodologia	32
3.3.1	Volume de sedimentos	33
3.3.2	Centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos	35
3.3.3	Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos..	35
3.3.4	Procedimento ArcGIS 10.3	36
4	Distribuição dos sedimentos da alimentação artificial.....	39
4.1	Impacto da altura de onda	39
4.2	Impacto da orientação da onda.....	40
4.3	Impacto das condições fronteira.....	42
4.3.1	Fronteira Norte	43
4.3.2	Fronteira Sul.....	46
4.4	Análise no tempo.....	47
4.5	Sumário	59
5	Velocidade de transporte da alimentação	63
5.1	Centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos	63
5.2	Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos.....	66
5.3	Sumário	70
6	Aplicações à faixa costeira portuguesa.....	75
6.1	Considerações sobre a modelação	77
6.2	Metodologia	79
6.3	Resultados	80
7	Considerações finais.....	87
7.1	Conclusões	87
7.2	Desenvolvimentos futuros.....	90

Referências bibliográficas.....	95
Anexos.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 - Dade County, Flórida (adaptado de SlideShare, 2015).	10
Figura 2.2 - <i>The Delfland Sand Engine</i> (retirado de Ecoshape, 2015).	11
Figura 2.3 - Processos de transporte longitudinal (retirado de Coelho, 2005).	12
Figura 2.4 - Alterações sazonais do perfil de praia provocadas pelo transporte transversal de sedimentos, considerando que não ocorrem gradientes no transporte longitudinal (adaptado de Kamphuis, 2000).	13
Figura 2.5 - Operação de dragagem da barra do Porto de Aveiro. As areias resultantes desta dragagem foram usadas para reforçar o cordão dunar na zona da Costa Nova (retirado de ICISA, 2015).	14
Figura 2.6 - Evolução de uma alimentação artificial (adaptado de Kamphuis, 2000).	16
Figura 2.7 - Vista em planta dos processos de erosão associados às alimentações artificiais de sedimentos (adaptado de Bodegon, 2004).	16
Figura 2.8 - Formas de colocação da alimentação artificial de sedimentos (adaptado de Hearon <i>et al.</i> , 2002).	18

Capítulo 3

Figura 3.1 - Representação esquemática da formulação base nos modelos de uma linha e o modelo LTC (retirado de Coelho, 2005).	27
Figura 3.2 - Exemplo da aplicação da alimentação artificial de sedimentos em função do local onde são estimadas as características da rebentação da onda no modelo numérico LTC.	28
Figura 3.3 - Região de estudo.	29
Figura 3.4 - Metodologia para o cálculo dos volumes.	34

Capítulo 4

Figura 4.1 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, ao fim de 5 anos de simulação, em função da altura de onda ($\alpha = 60^\circ$; Ext/Ext).	40
---	----

Figura 4.2 - Configuração da linha de costa em planta para as diferentes alturas de onda, em função do rumo de proveniência da agitação (5º ano de simulação; Ext/Ext)	41
Figura 4.3 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, ao fim de 5 anos de simulação, em função do rumo de proveniência da agitação marítima (H = 4 m; Ext/Ext).	42
Figura 4.4 - Posição das linhas de costa ao fim de 5 anos, no cenário de não ser realizada alimentação artificial de sedimentos ($\alpha = 60^\circ$).	45
Figura 4.5 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, em função das condições fronteira	45
Figura 4.6 - Posição das linhas de costa no trecho 1 em diferentes tempos de simulação e condições fronteira da grelha modelada de Fec/Fec (H = 4 m; $\alpha = 70^\circ$).	46
Figura 4.7 - Impacto da alimentação artificial em termos de área nos trechos costeiros, em diferentes instantes de simulação e para diferentes condições fronteira ($\alpha = 85^\circ$).	48
Figura 4.8 - Impacto da alimentação artificial em termos de volumes nos trechos costeiros, em diferentes instantes de simulação e para diferentes condições fronteira ($\alpha = 85^\circ$).	49
Figura 4.9 - Volume de sedimentos em função do tempo em cada trecho costeiro (H = 3 m; Ext/Ext).	50
Figura 4.10 - Área ganha no trecho 10, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.	53
Figura 4.11 - Área ganha no trecho 8, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.	54
Figura 4.12 - Posição das linhas de costa no trecho 10 em diferentes tempos de simulação (H = 3 m; $\alpha = 60^\circ$; Fec/Fec).	55
Figura 4.13 - Posição das linhas de costa em planta no trecho 10 para diferentes rumos de proveniência da agitação (H = 3m; Fec/Fec; 4º ano de simulação)	55
Figura 4.14 - Posição das linhas de costa no trecho 8 em diferentes tempos de simulação (H = 3 m; $\alpha = 60^\circ$; Fec/Fec).	56
Figura 4.15 - Área ganha no trecho 9, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.	58
Figura 4.16 - Posição da evolução das linhas de costa nos trechos 9 e 10 em diferentes tempos de simulação (H = 2 m; $\alpha = 85^\circ$; Fec/Fec).	59

Capítulo 5

Figura 5.1 - Evolução das linhas de costa nos extremos da grelha modelada no caso dos extremos estarem sujeitos a fronteira fechada, em função do rumo de proveniência da agitação marítima ($H = 2$ m; 5º ano de simulação).	65
Figura 5.2 - Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo, para diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira.	68

Capítulo 6

Figura 6.1 - Vista aérea da zona de estudo (Google Earth, 2016).	75
Figura 6.2 - Vista aérea dos troços costeiros analisados (Google Earth, 2016).	76
Figura 6.3 - Batimetria/topografia considerada na modelação.	78
Figura 6.4 - Local de deposição da alimentação artificial de sedimentos.	79
Figura 6.5 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do troço Esmoriz - Furadouro.	80
Figura 6.6 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do troço Barra - Vagueira.	80
Figura 6.7 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do troço Figueira da Foz - Leirosa.	81
Figura 6.8 - Evolução das áreas em planta no tempo nos troços costeiros analisados.	83
Figura 6.9 - Evolução dos volumes no tempo nos troços costeiros analisados.	83

Anexos

Figura A.1 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Fec	103
Figura A.2 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Fec	103
Figura A.3 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Fec	103
Figura A.4 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Fec	104

Figura A.5 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1\text{ m}$, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Fec.	104
Figura A.6 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1\text{ m}$, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Fec.	104
Figura A.7 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Fec.	105
Figura A.8 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Fec.	105
Figura A.9 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Fec.	105
Figura A.10 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Fec.	106
Figura A.11 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Fec.	106
Figura A.12 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2\text{ m}$, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Fec.	106
Figura A.13 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Fec.	107
Figura A.14 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Fec.	107
Figura A.15 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Fec.	107
Figura A.16 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Fec.	108
Figura A.17 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Fec.	108
Figura A.18 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3\text{ m}$, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Fec.	108
Figura A.19 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4\text{ m}$, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Fec.	109
Figura A.20 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4\text{ m}$, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Fec.	109

Figura A.21 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Fec.	109
Figura A.22 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Fec.	110
Figura A.23 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Fec.	110
Figura A.24 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Fec.	110
Figura A.25 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Ext/Ext.	111
Figura A.26 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Ext/Ext.	111
Figura A.27 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Ext/Ext.	111
Figura A.28 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Ext/Ext.	112
Figura A.29 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Ext/Ext.	112
Figura A.30 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Ext/Ext.	112
Figura A.31 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Ext/Ext.	113
Figura A.32 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Ext/Ext.	113
Figura A.33 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Ext/Ext.	113
Figura A.34 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Ext/Ext.	114
Figura A.35 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Ext/Ext.	114
Figura A.36 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Ext/Ext.	114

Figura A.37 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Ext/Ext.	115
Figura A.38 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Ext/Ext.	115
Figura A.39 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Ext/Ext.	115
Figura A.40 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Ext/Ext.	116
Figura A.41 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Ext/Ext.	116
Figura A.42 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Ext/Ext.	116
Figura A.43 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Ext/Ext.	117
Figura A.44 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Ext/Ext.	117
Figura A.45 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Ext/Ext.	117
Figura A.46 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Ext/Ext.	118
Figura A.47 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Ext/Ext.	118
Figura A.48 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Ext/Ext.	118
Figura A.49 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Ext.	119
Figura A.50 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Ext.	119
Figura A.51 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Ext.	119
Figura A.52 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Ext.	120

Figura A.53 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Ext.	120
Figura A.54 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 1$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Ext.	120
Figura A.55 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Ext.	121
Figura A.56 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Ext.	121
Figura A.57 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Ext.	121
Figura A.58 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Ext.	122
Figura A.59 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Ext.	122
Figura A.60 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 2$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Ext.	122
Figura A.61 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Ext.	123
Figura A.62 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Ext.	123
Figura A.63 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Ext.	123
Figura A.64 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Ext.	124
Figura A.65 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Ext.	124
Figura A.66 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 3$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Ext.	124
Figura A.67 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 60^\circ$ e Fec/Ext.	125
Figura A.68 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 65^\circ$ e Fec/Ext.	125

Figura A.69 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 70^\circ$ e Fec/Ext.	125
Figura A.70 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 75^\circ$ e Fec/Ext.	126
Figura A.71 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 80^\circ$ e Fec/Ext.	126
Figura A.72 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia: $H = 4$ m, $\alpha = 85^\circ$ e Fec/Ext.	126

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Estimativa do volume de sedimentos ao fim de um ano de simulação, em função da abordagem de cálculo ($\times 10^6 \text{ m}^3$).	34
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Posição ocupada (km) pelo centro de gravidade da alimentação artificial. Valores no tempo, em função das características da agitação marítima e das condições fronteira dos extremos da grelha modelada.	64
Tabela 5.2 - Velocidade (m/ano) do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo, em função das condições de agitação marítima e condições dos extremos da grelha modelada.	67
Tabela 5.3 - Velocidade média (m/ano) do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos, no tempo total de simulação.	70

Capítulo 6

Tabela 6.1 - Área da região modelada e área de implantação da alimentação artificial de sedimentos em cada troço costeiro.	79
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviaturas e acrónimos

<i>CERC</i>	Coastal Engineering Research Center
<i>GENESIS</i>	Generalized Model for Simulating Shoreline Change
<i>GTL</i>	Grupo de Trabalho do Litoral
<i>LTC</i>	Long-Term Configuration
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>ZH</i>	Zero Hidrográfico

Letras latinas maiúsculas

D_oC	Profundidade de fecho
H_0	Altura de onda ao largo
H_b	Altura de onda na rebentação
H_{sb}	Altura de onda significativa
K_d	Coeficiente de difração da onda
K_r	Coeficiente de refração da onda
K_s	Coeficiente de empolamento da altura de onda na rebentação
L_0	Comprimento de onda ao largo
L_b	Comprimento de onda na rebentação
Q	Volume potencial de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo
Ru	Limite de espraçamento máximo da onda
T	Período de onda
T_p	Período de onda de pico

Letras latinas minúsculas

d_{50}	Dimensão média dos sedimentos
h_b	Profundidade para a qual ocorre a rebentação da onda
g	Aceleração da gravidade (9.81 m/s^2)
k	Coeficiente de proporcionalidade empírico e adimensional, aplicado na fórmula CERC

m_b	Declive da praia
n	Porosidade dos sedimentos

Letra gregas

β	Ângulo da inclinação da praia submersa em relação a um plano horizontal
θ_0	Direção de incidência da onda ao largo
θ_b	Direção de incidência da onda na rebentação
Υ_b	Índice de profundidade de rebentação
Δt	Intervalo de tempo no cálculo da variação de volume no trecho Δy , no modelo LTC
ΔV	Variação de volume no trecho Δy e no intervalo de tempo Δt , no modelo LTC
Δy	Comprimento dos trechos discretos da linha de costa, no modelo LTC
Δz	Variação uniforme da cota em toda a largura ativa do perfil transversal, no modelo LTC
ρ	Massa volúmica da água do mar
ρ_s	Massa volúmica dos sedimentos

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O tema desta dissertação incide sobre a evolução morfológica do litoral após alimentações artificiais de sedimentos. O trabalho desenvolvido pretendeu analisar o impacto que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca na morfologia através de modelação numérica. Neste capítulo é apresentado o enquadramento do tema da dissertação, os objetivos do trabalho e a estrutura do conteúdo do presente documento.

1.1 Enquadramento do problema

Ao longo da costa grandes volumes de sedimentos são transportados devido à ação das ondas, correntes e ventos (deriva litoral). As formas que o litoral adquire são dependentes da relação dinâmica entre a agitação incidente, considerado o principal agente modelador e responsável pela capacidade de transporte de sedimentos, e as características e disponibilidades de areias existentes na zona e que a ela afluem transportadas fundamentalmente por ação das correntes litorais (Antunes - Carmo, 2016). Se a quantidade de sedimentos que sai de um trecho costeiro for balanceada pela chegada da mesma quantidade de sedimentos, não ocorre erosão nem acreção. Mas se esse balanço não for mantido irão ocorrer fenómenos de erosão ou acreção que se refletem em recuos ou avanços da linha de costa (Housley, 1996). Atualmente, observações existentes a nível planetário mostram evoluções acentuadas nas zonas costeiras resultando em algumas locais numa perda significativa do território (Coelho, 2005). A nível da zona costeira continental do território português verifica-se o agravamento dos fenómenos de erosão que se repercutem numa situação generalizada de recuo da linha de costa (Veloso Gomes, 2007). Essa tendência regressiva do litoral português é observada desde os finais do século XIX e é geralmente relacionada com a redução do fornecimento sedimentar associado à atividade antrópica (Santos *et al.*, 2014a).

As zonas costeiras constituem zonas de risco, designadamente porque correspondem a áreas tampão relacionadas com eventos marinhos muito energéticos, como temporais, havendo necessidade de se proteger corretamente populações e atividades económicas (Dias, 2005). No entanto, segundo Dias (2005), sobre as zonas costeiras desenvolvem-se múltiplas

atividades relacionadas com diferentes tipos de turismo, com exploração de recursos vivos, com indústrias variadas, com o transporte, com a produção de energia, com a exploração de recursos geológicos, etc. Assim, verifica-se frequentemente um conflito entre ocupações ou atividades e a evolução da linha de costa. Em Portugal, é nos concelhos do litoral que se encontra 75% da população e que se produz 85% do PIB (Lacasta, 2016).

Devido à necessidade de se proteger as zonas costeiras é comum recorrer-se a intervenções de defesa costeira. Coelho (2005) divide essas intervenções em alimentação e reperfilamento das praias (por exemplo, alimentações artificiais de praias) ou intervenções de manutenção da posição da linha de costa (por exemplo, quebra-mares ou esporões). A alimentação artificial de sedimentos apresenta como principal diferença relativamente às restantes intervenções de defesa costeira o facto de se adicionar areia ao sistema costeiro, sendo que, o Grupo de Trabalho do Litoral (GTL), criado após o rigoroso inverno de 2013/2014, definiu como principal estratégia de intervenção de defesa costeira para o litoral português a reposição do balanço sedimentar costeiro, através de alimentações artificiais de sedimentos. Em geral as razões que sustentam a opção das alimentações artificiais são o facto de esta medida combater/mitigar a erosão costeira, prevenir inundações e possibilitar a manutenção de uma praia ampla que sirva propósitos recreativos (Verhagen, 1992).

Associado ao processo de alimentação artificial na zona costeira está a perceção e a opinião das pessoas em geral, condicionada pela respetiva expectativa. Se é um proprietário de um imóvel nas imediações, ele olha para a proteção. Se é um visitante, ele procura um local de recreação. E se é um contribuinte a partir de um local distante, ele olha para um retorno sobre o seu investimento (Housley, 1996). Desta forma é fundamental sustentar as opções de mitigação dos problemas de erosão costeira. Como ferramenta de apoio à decisão e previsão pode-se recorrer à utilização de modelos numéricos, uma vez que, permitem modelar diversos cenários, comparando desempenhos e tornando-se uma técnica poderosa de apoio na avaliação de soluções (Coelho, 2005).

1.2 Objetivos do trabalho

A presente dissertação aborda o tema da evolução morfológica do litoral após alimentações artificiais de sedimentos. O principal objetivo corresponde a apresentar contributos para antecipar como se distribuem espacial e temporalmente os sedimentos após uma intervenção de alimentação. É de referir que, o desempenho de uma operação de alimentação artificial de sedimentos é condicionado por múltiplas variáveis associadas à dinâmica sedimentar e por variáveis inerentes ao próprio processo de alimentação artificial. No presente trabalho pretende-se avaliar o impacto da alimentação artificial na morfologia em diferentes tipos de praia, definidas pelas trocas sedimentares com o exterior, em função de variáveis relacionados com a agitação marítima (altura e rumo de proveniência da agitação). Após o estudo do impacto da alimentação artificial na morfologia, em função das variáveis mencionadas anteriormente, tenta-se caracterizar a velocidade de transporte da alimentação através do estudo da posição ocupada pelo centro de gravidade da alimentação artificial. Por fim, considera-se a operação de alimentação artificial em três troços costeiros da faixa continental portuguesa.

Em suma, procura-se compreender, através da utilização do modelo numérico LTC, quais os impactos e eventuais benefícios que a adoção de alimentações artificiais de sedimentos, como medida de defesa costeira, têm sobre a evolução da morfologia do litoral em diferentes cenários de agitação marítima e diferentes tipos de praia.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. Após um breve enquadramento geral do tema e da descrição dos objetivos a cumprir com o desenvolvimento do trabalho, segue-se o capítulo 2 em que se faz uma abordagem teórica das questões relacionadas com as alimentações artificiais de sedimentos. Começa-se por fazer uma referência à dinâmica sedimentar no litoral e posteriormente referem-se as questões relacionadas com as fontes de empréstimo e os locais de depósito associados aos processos de alimentação.

Em seguida, o capítulo 3 inicia-se com uma breve descrição dos modelos numéricos que permitem simular o efeito das alimentações artificiais na evolução da posição da linha de costa ao longo do tempo, com ênfase nos pressupostos de funcionamento do modelo LTC. O desempenho de uma intervenção de alimentação é condicionado por múltiplas variáveis que têm impacto na dinâmica sedimentar. Assim, neste capítulo são apresentados os cenários modelados (correspondentes a situações genéricas) e as considerações sobre a modelação que têm em conta essas variáveis. Posteriormente, é exposta a metodologia seguida no presente trabalho com o objetivo de se compreender os processos de evolução do litoral após a alimentação artificial de sedimentos.

A compreensão do impacto da alimentação artificial sobre a morfologia é fundamental para avaliar o desempenho e eficácia das intervenções. Assim, no capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados da simulação da alimentação artificial de sedimentos, avaliados pela distribuição do volume de sedimentos na região modelada e ganhos ou perdas de área de território. Na sequência da análise do impacto e desempenho da alimentação artificial de sedimentos, no capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados da velocidade de transporte sedimentar associada aos sedimentos que resultam da alimentação artificial.

No capítulo 6 é realizada uma análise qualitativa do impacto da alimentação artificial de sedimentos sobre três troços costeiros da faixa costeira portuguesa, representando casos de estudo específicos em troços onde se prevê que possam ocorrer alimentações artificiais de sedimentos.

Por último, no capítulo 7, são expostas todas as considerações finais sobre o trabalho realizado, bem como propostas para possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.

Capítulo 2

ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

2 ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

A alimentação artificial de sedimentos consiste no fornecimento de areia ao sistema costeiro (deriva litoral, praia ou duna) com o objetivo de se fortalecer o perfil costeiro e aumentar a provisão de sedimentos no litoral. Nas zonas costeiras de areia, a alimentação artificial de sedimentos pode ser considerada uma medida eficiente para preservar a linha de costa e salvaguardar as naturais funções de defesa costeira, bem como manter funções recreativas (Van Heuvel, 2011).

Segundo Housley (1996) a alimentação artificial de sedimentos é a única solução que se apresenta como verdadeira alternativa para resolver o déficit de sedimentos no litoral, uma vez que, esta solução permite adicionar areia ao sistema costeiro. A implementação de estruturas de defesa costeira como esporões ou quebra-mares podem reduzir a erosão num determinado local, mas o déficit de sedimentos irá prevalecer fazendo com que a erosão ocorra em outro local.

Para Tondello *et al.* (1998) as alimentações artificiais de sedimentos apresentam-se como uma importante ferramenta de gestão de riscos costeiros pois este tipo de intervenção apresenta vários benefícios. São exemplo de benefícios a possibilidade de reduzir a erosão e os danos provocados pelas inundações, melhorar os fins recreativos e turísticos das zonas costeiras, ser uma medida reversível, aumentar a quantidade de sedimentos disponíveis e assim atenuar o déficit de sedimentos na zona costeira, reduzir o impacto de proteções costeiras que interrompem o transporte sedimentar na direção longitudinal e ainda, os custos deste tipo de intervenção poder ser distribuído ao longo do tempo.

Na Figura 2.1 é apresentada a costa de Dade County, Flórida, antes e após a realização de alimentação artificial. As praias de Dade County foram sujeitas a um projeto de reestruturação que começou no ano de 1977, ao longo de 17 quilómetros de extensão. A necessidade de realização deste projeto deveu-se ao facto desta zona da costa apresentar uma elevada erosão e ser importante manter o valor recreativo das praias dessa zona costeira (CERC, 1984a).



a) Antes da alimentação artificial



b) Depois da alimentação artificial

Figura 2.1 - Dade County, Flórida (adaptado de SlideShare, 2015).

As ações de alimentação artificial de sedimentos no litoral holandês são um caso de estudo que aponta no sentido de que as alimentações devem ser ações pontuais de elevada magnitude e baixa frequência temporal (Santos *et al.*, 2014a). Desde 1990 que devido à elevada taxa de erosão verificada na costa holandesa se têm realizado alimentações artificiais de sedimentos em intervalos de tempo regulares. Inicialmente, o volume total de alimentação era de 6 milhões de m^3 e a partir de 2001 passou para 12 milhões de m^3 . Sendo que se estima que em 2100 os volumes necessários rondarão os 40 a 85 milhões de m^3 por ano (De Vriend e Van Koningsveld, 2012). No entanto, a realização de alimentações com volumes de areia entre 2 a 5 milhões de m^3 apresenta geralmente um tempo de vida útil de 5 anos. Em Delfland foi realizado um projeto que é considerado uma referência recente e de grande impacto no que se refere às alimentações artificiais de sedimentos designado por *The Delfland Sand Engine* (Figura 2.2). Este projeto consistiu na realização de uma alimentação concentrada, no espaço e no tempo, de 21.5 milhões de metros cúbicos de areia, o que conduz a uma frequência de perturbação dos ecossistemas muito menor, permitindo que a natureza tenha mais tempo para desenvolver novos ecossistemas e aumentar a biodiversidade (Ecoshape, 2015).

Em Portugal a alimentação artificial das praias foi aplicada pela primeira vez em 1950 na praia do Estoril numa empreitada que envolveu a colocação de 15 000 m^3 (Martins e Veloso Gomes, 2011). Na década de 70 desse século foi realizada a alimentação da praia da Rocha a partir de sedimentos dragados no estuário do rio Arade. Entre a década de 1980 e a atualidade foram realizadas várias operações de alimentação artificial de praias portuguesas (Paixão, 1998).



a) Após a realização (2012)

b) Em 2015

Figura 2.2 - *The Delfland Sand Engine* (retirado de Ecoshape, 2015).

2.1 Dinâmica sedimentar – processos de transporte

A evolução morfológica do litoral depende do transporte de sedimentos que ocorre ao longo da costa. Os sedimentos no litoral são transportados devido ao efeito da ação das correntes, das ondas e do vento. Consoante o movimento que os sedimentos adquirem é comum o transporte sedimentar no litoral ser dividido em duas componentes: transporte longitudinal, em que os sedimentos são transportados numa direção paralela à linha de costa e transporte transversal, em que os sedimentos são transportados numa direção perpendicular à costa (CERC, 1984a).

Segundo Kamphuis (2000), o movimento dos sedimentos ao longo da costa pode provocar erosão ou acreção, sendo que, a erosão provoca recessão da linha de costa (remoção de sedimentos) e a acreção provoca o avanço da posição da linha de costa em direção ao mar (adição de sedimentos).

2.1.1 Transporte sedimentar longitudinal

Segundo Coelho (2005), o transporte sólido longitudinal ocorre devido ao arrastamento de sedimentos provocado pelas correntes na zona próxima da praia e pelo transporte em suspensão na zona de rebentação das ondas (Figura 2.3). Os gradientes de transporte sedimentar longitudinal são responsáveis por mudanças a médio e longo prazo na posição da linha de costa (Rodrigues, 2010). A quantidade de sedimentos transportados longitudinalmente depende do ângulo de aproximação, duração e energia da onda (CERC, 1984a). Assim, a quantificação do transporte longitudinal depende essencialmente

da altura, período e direção das ondas, da dimensão dos sedimentos e do declive do fundo (Plecha *et al.*, 2011). O período de prevalência das ondas sobre a costa é significativo no transporte de sedimentos. Ondas geradas por tempestades movem maior quantidade de sedimentos por unidade de tempo que as ondas em regime normal. No entanto, se as ondas que ocorrem em regime normal prevalecerem mais tempo que as ondas geradas por tempestades, as ondas normais podem ter um papel mais significativo no transporte de areia do que as ondas de tempestade (CERC, 1984a).

Portanto, o tempo de permanência da areia num determinado local e a sua perda para a vizinhança deve-se sobretudo ao transporte sedimentar que ocorre na direção paralela à costa, transporte sedimentar longitudinal, e é responsável pelas alterações da linha de costa a longo termo.

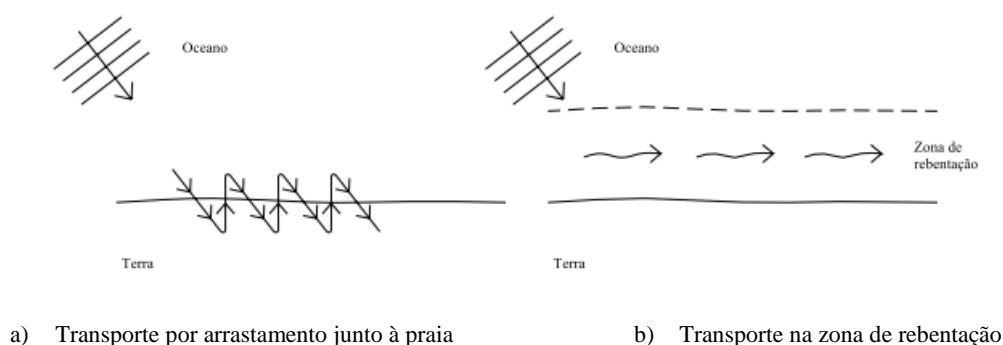


Figura 2.3 - Processos de transporte longitudinal (retirado de Coelho, 2005).

2.1.2 Transporte sedimentar transversal

O perfil transversal de praia reflete a forma (profundidade em função da distância à costa) da praia em resposta às ações das ondas e do nível da água (Kamphuis, 2000).

O transporte sedimentar transversal depende da dimensão dos grãos dos sedimentos, inclinação do talude de praia e declividade das ondas. As ondas altas tendem a provocar erosão na linha de costa, pois retiram o material para o mar e as ondas baixas, ondas de menor período, tendem a provocar acreção de sedimentos na linha de costa (CERC, 1984a).

Segundo Coelho (2005), no caso de não existir gradientes no transporte sedimentar longitudinal, os sedimentos transportados transversalmente são redistribuídos no perfil transversal, não havendo perdas ou ganhos de sedimentos. A zona do perfil onde ocorrem

alterações da batimetria/topografia do perfil transversal designa-se por perfil ativo. O perfil da praia tende a adquirir um perfil de equilíbrio dinâmico que depende da ação das ondas irregulares, diferentes estados energéticos e rumos de agitação. Assim, a forma do perfil transversal de praia reflete o comportamento a curto prazo da evolução morfológica do litoral e a relação entre comportamentos verão/inverno ou períodos de tempestade (Figura 2.4).

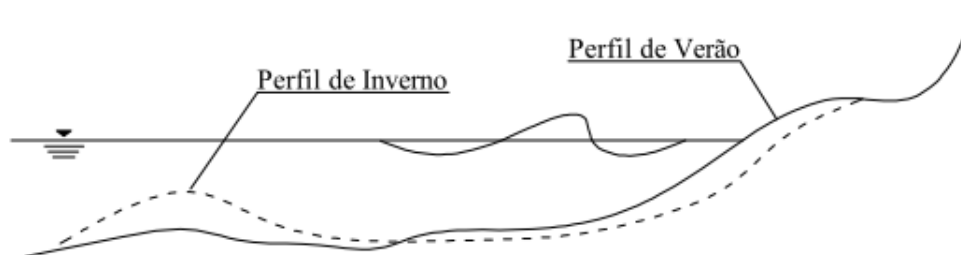


Figura 2.4 - Alterações sazonais do perfil de praia provocadas pelo transporte transversal de sedimentos, considerando que não ocorrem gradientes no transporte longitudinal (adaptado de Kamphuis, 2000).

2.2 Locais de empréstimo

Um aspeto importante nos projetos de alimentação artificial é a escolha da fonte de empréstimo de sedimentos. Esta escolha é condicionada por vários fatores, nomeadamente disponibilidade de sedimentos no local de empréstimo, custos e compatibilidade entre os sedimentos nativos (no local onde se prevê realizar a deposição de sedimentos) e de empréstimo. Os custos associados à escolha do local de empréstimo estão relacionados com os equipamentos que é necessário utilizar para coletar os sedimentos e transportá-los para o local onde se prevê realizar a alimentação artificial e a distância a percorrer entre o local de empréstimo e o local de deposição. Relativamente aos equipamentos, segundo Dean (2002), a alimentação artificial pode ser realizada recorrendo-se à utilização de dragas, camiões ou correias transportadoras.

A compatibilidade entre os sedimentos nativos e os sedimentos de empréstimo é baseada principalmente na dimensão dos grãos e, em menor medida, na cor dos sedimentos (Gravens *et al.*, 2008). Segundo Gravens *et al.* (2008) o aspeto mais importante na escolha do material de empréstimo é a dimensão dos sedimentos. Para Hearon *et al.* (2002), os sedimentos com que são realizadas as alimentações artificiais devem possuir características idênticas aos sedimentos da praia nativa. Sedimentos de maior dimensão tenderão a ser mais estáveis, enquanto sedimentos de menor dimensão são mais instáveis e tendem a sofrer

erosão mais facilmente (Hearon *et al.*, 2002). Normalmente, os sedimentos de fontes provenientes do mar são de melhor qualidade porque contêm menor quantidade de sedimentos finos que os provenientes de lagos (CERC, 1984b).

Quando a fonte de sedimentos se localiza sob a água, é necessário proceder a dragagens. As dragagens consistem na remoção de sedimentos e detritos do fundo do mar, lagos, rios ou portos. As dragagens são uma importante ferramenta na manutenção das condições de navegabilidade de canais e portos, uma vez que, permitem manter a profundidade dos mesmos e assim garantir condições de navegabilidade seguras para os barcos e navios (NOAA, 2015). Assim, os sedimentos provenientes das operações de dragagem podem ser um recurso interessante para se realizar as alimentações artificiais de sedimentos e desta forma, atenuar-se o déficit sedimentar na zona costeira (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Operação de dragagem da barra do Porto de Aveiro. As areias resultantes desta dragagem foram usadas para reforçar o cordão dunar na zona da Costa Nova (retirado de ICSA, 2015).

2.2.1 Dragagens ao largo

Segundo Dean (2002), mais de 95% dos volumes de areia usados nos projetos de alimentações proveem de dragagens no mar, sendo que, a principal vantagem desta fonte de sedimentos resulta do facto de que normalmente grandes quantidades de areias adequadas podem ser localizadas em áreas que variam de 1 km a 20 km do local de alimentação. A realização de dragagens ao largo também apresenta as vantagens de durante as operações de dragagem não se provocarem grandes perturbações para as comunidades ao longo da costa, como a interrupção do tráfego rodoviário e o desgaste provocado pelos camiões pesados nas estradas, e de se poder dragar grandes volumes de areias, o que torna mais económica a operação, conduzindo a um custo unitário mais reduzido (Dean, 2002).

Dean (2002) aponta como desvantagem deste tipo de dragagem o facto destas dragagens terem de ser realizadas a uma distância suficiente para que se situem ao largo do perfil ativo da praia, para que a areia colocada no local de depósito não seja de novo transportada para o local de empréstimo, por ação das ondas e correntes.

2.2.2 Dragagens em portos e canais de navegação

Criar e manter as condições de navegabilidade em portos e canais de navegação requer a escavação e eliminação de grandes volumes de sedimentos que se depositam nesses locais. Em muitos casos o material dragado apresenta qualidade suficiente para poder ser usado em projetos de alimentação ao longo do litoral (Gravens *et al.*, 2008). A nível de custos, esta fonte de sedimentos torna-se economicamente interessante, uma vez que, a realização de dragagens em portos e canais de navegação é obrigatória para se garantir as condições de navegabilidade e assim os sedimentos podem ser reutilizados. Na Califórnia este tipo de recurso de sedimentos é conhecido como “*Sand of opportunity*”, uma vez que, o principal objetivo destas dragagens não é a colocação nas praias, mas os sedimentos podem ser usados para esse fim. A principal desvantagem deste tipo de dragagens é requerer que se realizem análises cuidadas aos sedimentos dragados de forma a examinar-se a respetiva dimensão e a eventual existência de poluentes (Hearon *et al.*, 2002).

2.3 Locais de depósito – processos de deposição

Num projeto de alimentação artificial de sedimentos, para além do volume a colocar é necessário ter em conta a forma e local de colocação e necessidade de possíveis realimentações, uma vez que, é importante perceber como evolui espacial e temporalmente a zona costeira após a intervenção de alimentação.

O conceito de alimentação artificial de sedimentos baseia-se na simulação de formações naturais de dunas ou praias. O material colocado artificialmente apresenta um perfil que é diferente do perfil estável e tem um comprimento limitado ao longo da costa. Após a colocação, o material espalhar-se-á e tende para uma linha de costa reta ou ligeiramente curva (Figura 2.6). Na direção perpendicular à linha de costa a alimentação tenderá a uma

forma de perfil estável. Em termos longitudinais, o centro de massa da alimentação tenderá a mover-se na direção em que se dá o transporte dos sedimentos (Kamphuis, 2000).

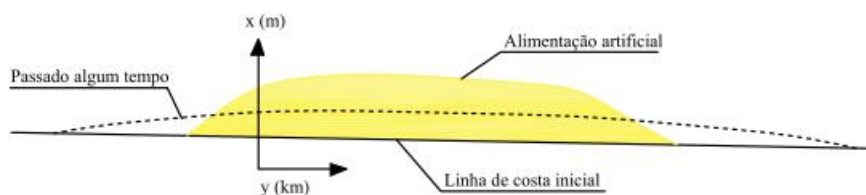


Figura 2.6 - Evolução de uma alimentação artificial (adaptado de Kamphuis, 2000).

Segundo Bodegon (2004), após a alimentação, os sedimentos com que é realizada a alimentação artificial misturam-se com os sedimentos nativos e são distribuídos transversalmente e ao longo da costa por ação das ondas e correntes. Essa mistura é realizada pelos processos de transporte que ocorrem devido à dinâmica sedimentar do local e por perdas que ocorrem no momento da colocação da alimentação (Figura 2.7).

Dependendo das condições do local e das características da intervenção, uma alimentação artificial de sedimentos pode levar meses ou anos até atingir uma condição de equilíbrio. A alimentação pode ser realizada colocando-se os sedimentos sobre as dunas, na zona seca da praia, no perfil de praia que se estende desde a zona seca até para lá da zona de rebentação, ou na zona submersa do perfil de praia, criando-se uma barra de areia (Hearon *et al.*, 2002).

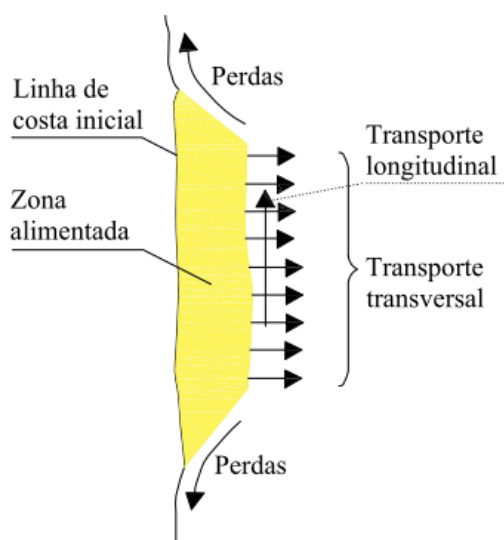


Figura 2.7 - Vista em planta dos processos de erosão associados às alimentações artificiais de sedimentos (adaptado de Bodegon, 2004).

2.3.1 Alimentação na zona das dunas

De acordo com Hearon *et al.* (2002), a colocação da alimentação artificial na zona das dunas é eficaz na proteção contra os riscos de ondas geradas por tempestades, uma vez que, a existência de dunas minora perigos de inundação em situações de emergência provocadas por tempestades. No entanto, a colocação do material de enchimento nesta zona não aumenta a zona de praia, pelo que se torna pouco interessante quando o objetivo da alimentação passa por manter os fins recreativos da praia (Figura 2.8a).

2.3.2 Alimentação na zona seca da praia

A colocação da alimentação artificial na zona seca da praia é uma das técnicas mais comuns. Neste tipo de alimentações a areia é colocada na parte seca da praia e perto da linha de água, e apresenta como resultado imediato um aumento da largura de praia disponível para recreação (Figura 2.8b). No entanto, como não é colocada nenhuma areia na zona submersa da praia, a areia vai ser redistribuída ao longo do perfil de praia até que este atinja um equilíbrio estável. Este processo resulta numa redução substancial da largura da praia seca inicial. Devido a este processo de redistribuição de sedimentos, que conduz à perda de areia da face da praia, este tipo de alimentação tem sido alvo de críticas, por parte do público menos informado, uma vez que traduz uma sensação de perda e ineficácia da intervenção. Assim, deve ficar claro que a areia se vai ajustar a uma configuração mais estável, resultando num estreitamento da largura inicial, de acordo com o projeto de alimentação, que é concebido tendo em conta essa redistribuição dos sedimentos (Hearon *et al.*, 2002).

2.3.3 Alimentação do perfil de praia

A alimentação artificial do perfil de praia envolve a colocação de areia em toda a secção de praia, tanto na zona emersa como na zona submersa (Figura 2.8c). Este tipo de alimentação tenta reconstruir a praia numa forma já estável, o que conduz a pequenas redistribuições de sedimentos e a mudanças reduzidas na largura da praia a seco. As principais desvantagens deste tipo de colocação prendem-se com o facto da sua colocação ser mais complexa e não oferecer grande proteção a situações de tempestade, uma vez que, não existe uma reserva

extra de areia na praia, como acontece quando a alimentação é colocada nas dunas ou na zona seca da praia (Hearon *et al.*, 2002).

2.3.4 Alimentação na zona submersa do perfil de praia

Este tipo de alimentação consiste na colocação do material de enchimento numa barra de areia na zona submersa do perfil de praia, sendo que, para a alimentação ser bem sucedida o material deve ser colocado na zona do perfil ativo da praia (Figura 2.8d). A areia irá mover-se gradualmente por ação das ondas e correntes aumentando a largura de praia. O tempo necessário para que os sedimentos sejam movidos para a zona da praia varia com as condições da agitação (Hearon *et al.*, 2002).

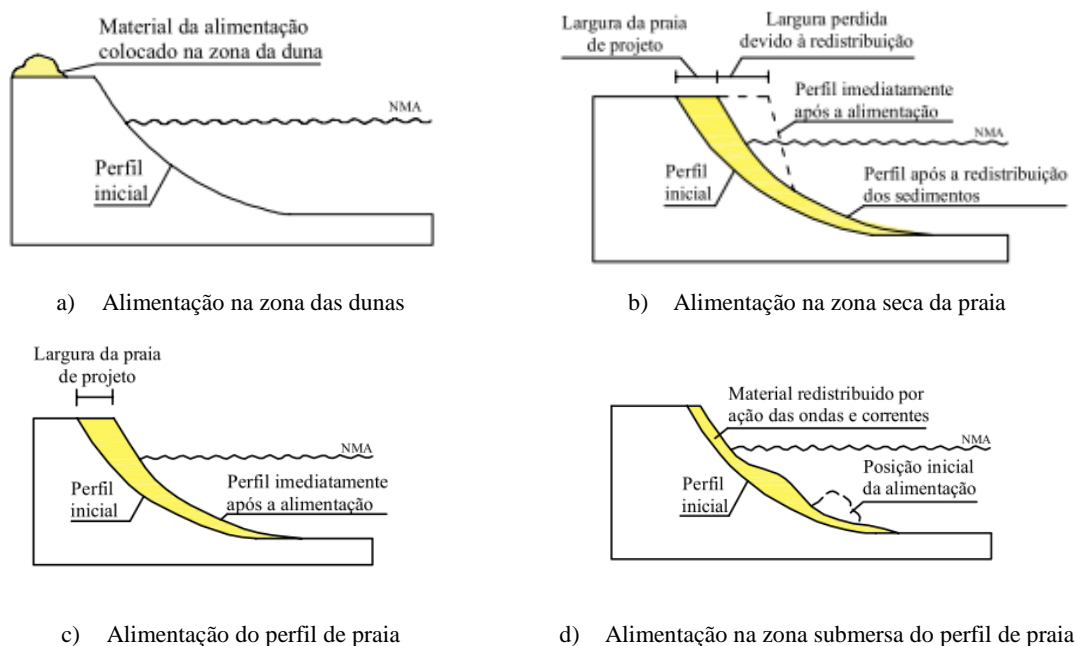


Figura 2.8 - Formas de colocação da alimentação artificial de sedimentos (adaptado de Hearon *et al.*, 2002).

Capítulo 3

MODELAÇÃO NUMÉRICA

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

A gestão sustentada da zona costeira passa pela capacidade de previsão da sua evolução morfológica a médio e longo prazo. Nesse contexto, a modelação numérica é uma importante ferramenta, uma vez que, permite, mediante determinados cenários, avaliar a evolução dos sistemas costeiros e o impacto de eventuais medidas de mitigação ou adaptação ao problema de erosão (Silva, 2010).

Os modelos mais utilizados para prever a evolução da linha de costa baseiam-se na técnica de “uma linha” (Thomas e Frey, 2013). O principal pressuposto da teoria de uma linha é a de que o perfil ativo de praia é limitado no sentido do mar por uma profundidade de fecho, para lá da qual não existe movimento significativo do fundo, e que o perfil transversal se move paralelamente a si próprio. Não havendo alteração do perfil de praia, a evolução da posição da linha de costa é apenas atribuída aos gradientes no transporte longitudinal (Silva, 2010).

Os modelos numéricos de evolução da linha de costa são uma generalização dos modelos analíticos, simulando a evolução da linha de costa para diferentes configurações de praia, podendo incluir diversos tipos de estruturas costeiras e condições fronteira, sob a ação da agitação marítima variável no espaço e no tempo (Silva, 2010). Exemplos deste tipo de modelos são o GENESIS (Hanson e Kraus, 1989), o ONELINE (Dabees e Kamphuis, 1997), o LITMOD (Vicente e Clímaco, 2003) e o LTC (Coelho, 2005).

O LTC (*Long-Term Configuration*) é um modelo numérico que permite simular a evolução a médio prazo da fisiografia costeira, desenvolvido por Coelho (2005) na Universidade de Aveiro. O programa foi desenvolvido com o objetivo de se melhorar a compreensão da capacidade de previsão da evolução da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo, por análise de um conjunto de conceitos associados ao transporte de sedimentos. Assim, face à conhecida importância económica e social das zonas costeiras este programa poderá ser uma importante ferramenta no processo de planeamento das zonas costeiras, por projecção de cenários de evolução da linha de costa, e apoiar a escolha de soluções de engenharia mais adequadas em termos técnicos, ambientais e socioeconómicos, para fazer face aos problemas de defesa da costa (Coelho, 2005).

O modelo foi desenvolvido para aplicação a praias arenosas e considera que o transporte sedimentar longitudinal, juntamente com as condições fronteira, nos extremos da grelha modelada são as principais causas das alterações na zona costeira, sendo, o transporte sedimentar longitudinal condicionado e/ou controlado pela ação das ondas, correntes, níveis de água, natureza dos sedimentos e sua fonte (Coelho, 2005).

Este modelo assume que cada onda atua individualmente durante um determinado período de tempo, o passo de tempo computacional, procedendo à sua transformação desde o largo até à rebentação, considerando os fenómenos de refração, empolamento e difração junto às estruturas costeiras. Para cada onda é estimado o transporte longitudinal induzido, fazendo-se um balanço sedimentar, em cada secção elementar da praia, através de uma equação de continuidade, e avaliando qual o volume de sedimentos em erosão e acreção. O volume calculado é distribuído pelo perfil transversal ativo definido entre o limite de espraiamento máximo da onda e a profundidade de fecho, verificando-se uma subida (acreção) ou descida (erosão) uniforme de todos os pontos do perfil ativo, sendo efetuadas correções a essas variações junto aos limites emerso e submerso do perfil. Assim, o LTC, calcula uma nova forma do perfil transversal entre a ação de cada onda. O modelo permite ao utilizador definir as inclinações mínimas do perfil submerso e emerso, sendo que, estas inclinações e a estabilidade dos taludes criados, função do ângulo de repouso dos sedimentos, vão controlar a variação do perfil (Silva, 2010).

Através do LTC é possível avaliar a evolução da linha de costa considerando a existência de diferentes intervenções de defesa costeira, nomeadamente fontes aluvionares pontuais, alimentações artificiais de praias, obras de defesa transversais, como esporões ou quebramares, e obras de defesa longitudinal aderente. Para a simulação da alimentação artificial de sedimentos no modelo numérico LTC, o utilizador define os parâmetros relativos ao volume total da alimentação, à área abrangida pela intervenção e ao período da alimentação (instante que começa e termina a alimentação artificial). O volume de sedimentos é distribuído por toda a área abrangida pela intervenção, sendo caracterizado pela soma de um valor uniforme à cota de todos os pontos da grelha inseridos na área modelada. No caso da inclinação do talude criado exceder a estabilidade máxima admissível pelo ângulo de atrito dos sedimentos, a redistribuição de cotas provoca deslizamento das areias para cotas mais profundas. Se o elevar de cotas em determinadas zonas do perfil provocar inclinações da praia inferiores ao mínimo estabelecido pelo utilizador,

a redistribuição é realizada para zonas inferiores de forma a eliminar esse efeito (Coelho, 2005).

3.1 Formulação teórica do modelo numérico LTC

Na presente subsecção são apresentados os principais conceitos teóricos que servem de base ao funcionamento do modelo LTC, nomeadamente relativos aos fenómenos de transformação da onda, transporte longitudinal de sedimentos e evolução morfológica da zona costeira.

3.1.1 Transformação da onda

Conhecidas as características ao largo de cada uma das ondas consideradas na simulação, o modelo procede à sua transformação até à rebentação, considerando de forma simplificada os fenómenos da refração, difração e empolamento. O modelo admite que as características da onda ao largo são idênticas em toda a extensão longitudinal do sector costeiro modelado, e recorre à teoria linear da onda para avaliar os processos de propagação da onda. O procedimento utilizado consiste na obtenção da profundidade para a qual ocorre a rebentação, h_b , e dos parâmetros caracterizadores das ondas na rebentação, altura de onda (H_b) e direcção de incidência da onda (θ_b), a partir dos parâmetros caracterizadores ao largo, altura de onda (H_0) e direcção de proveniência, ou rumo (θ_0) (Silva, 2010).

O modelo começa por calcular a profundidade para a qual ocorre a rebentação h_b , através do critério do índice de profundidade de rebentação (expressão 3.1), assentando no pressuposto inicial de que a altura de onda na rebentação é aproximadamente igual à altura de onda ao largo. Este critério tem sido universalmente utilizado, sendo o seu valor mais comum $Y_b = 0.78$. A profundidade de rebentação estimada desta forma será idêntica em toda a extensão longitudinal do setor costeiro em estudo, mas a localização da linha de rebentação será variável em planta, em função da topo-hidrografia (Silva, 2010).

$$Y_b = \frac{H_b}{h_b} \tag{3.1}$$

O processo de cálculo do modelo assume uma teoria simples de refração da onda. Assim, admite que ao longo da propagação da onda as linhas batimétricas são paralelas à linha de rebentação calculando o ângulo de incidência da onda na rebentação através da Lei de Snell, expressão 3.2, onde L_b representa o comprimento de onda na rebentação, L_0 o comprimento de onda ao largo e θ_0 o ângulo de incidência ao largo (Silva, 2010).

$$\frac{\sin \theta_b}{L_b} = \frac{\sin \theta_0}{L_0} \quad (3.2)$$

Determinado o ângulo de incidência da onda na rebentação por aplicação da Lei de Snell, e conhecida a profundidade de rebentação, por aplicação do critério de rebentação, a altura de onda na rebentação é determinada através do conhecimento e aplicação do coeficiente de empolamento da onda na rebentação (K_s) e do coeficiente de refração (K_r) à altura de onda ao largo (Coelho, 2005).

O coeficiente de refração na rebentação depende da direção de incidência de onda, ao largo e na rebentação, expressão 3.3, e o coeficiente de empolamento depende da profundidade (h_b) e do comprimento de onda na rebentação (L_b), expressão 3.4. O comprimento de onda na rebentação é determinado através da expressão 3.5 (Silva, 2010).

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_b}} \quad (3.3)$$

$$K_s = \frac{\cosh \frac{2\pi h_b}{L_b}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi h_b}{L_b} \cosh \frac{2\pi h_b}{L_b} + \frac{2\pi h_b}{L_b}}} \quad (3.4)$$

$$L_b = L_0 \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b} \quad (3.5)$$

O comprimento da onda ao largo é calculado através da expressão 3.6.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.6)$$

O fenómeno de difração ocorre quando na propagação da onda em direcção à costa, esta encontra um obstáculo. Este fenómeno de alteração e deformação consiste na transmissão lateral de energia e atenuação da altura de onda segundo a sua direcção de incidência (Silva, 2010). O modelo só aplica o coeficiente de difração no caso da existência de esporões ou obras longitudinais aderentes. Se estas estruturas não existirem o valor de K_d é 1 (Coelho, 2005).

A altura de onda na rebentação é obtida pela expressão 3.7.

$$H_b = K_d K_s K_r H_0 \quad (3.7)$$

3.1.2 Transporte longitudinal de sedimentos

O transporte longitudinal de sedimentos é um processo costeiro que controla a morfologia da praia, determinando se esta se encontra em situação de erosão, acreção ou em equilíbrio. Este transporte é essencialmente devido a correntes longitudinais induzidas pelas ondas (corrente de deriva litoral) quando estas se aproximam da praia segundo uma direcção oblíqua (Silva, 2010). O modelo numérico LTC disponibiliza duas formulações para a estimativa da taxa de transporte longitudinal de sedimentos: a fórmula CERC (1984a) e a fórmula desenvolvida por Kamphuis (1991).

O cálculo do potencial de transporte sólido pela fórmula CERC, expressão 3.8, depende de parâmetros como: um coeficiente empírico (k); a massa volúmica da água (ρ); a massa volúmica da areia (ρ_s); a aceleração da gravidade (g); a porosidade da areia (n); o índice de profundidade de rebentação (Y_b); a altura de onda significativa (H_{sb}); e o ângulo da onda na rebentação (θ_b). Esta expressão é homogénea em termos de unidades, sendo o resultado uma relação do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo.

$$Q = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 Y_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_{sb}^{5/2} \sin(2\theta_b) \quad (3.8)$$

A fórmula desenvolvida por Kamphuis, expressão 3.9, depende de propriedades como: a altura de onda significativa (H_{sb}); o período de pico do espectro da agitação marítima ao largo (T_p); o declive de praia que causa a rebentação (m_b); o diâmetro mediano dos sedimentos (d_{50}); e o ângulo da onda na rebentação (θ_b). Os resultados desta fórmula resultam em valores expressos em m³/hora, se a altura de onda na rebentação for expressa em metros, o período de onda em segundos e a dimensão dos sedimentos em milímetros.

$$Q = 7.3H_{sb}^4 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\theta_b) \quad (3.9)$$

3.1.3 Evolução morfológica

A formulação base do modelo LTC consiste no balanço de volumes considerando a equação de continuidade dos volumes de areia envolvidos no processo de transporte sedimentar. Assim, discretizando o tempo em intervalos Δt , a análise ao longo da linha de costa para trechos de comprimento Δy , permite relacionar a variação de volume com a variação no tempo dos caudais sólidos em transporte:

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext})\Delta t = (\Delta Q + Q_{ext})\Delta t \quad (3.10)$$

A variação do caudal sólido em transporte no comprimento Δy depende da diferença entre os volumes que entram (Q_i) e que saem (Q_{i-1}) do trecho de comprimento Δy em cada intervalo de tempo Δt , sendo que, os volumes sólidos em transporte no intervalo Δt dependem fundamentalmente da altura e orientação da onda na rebentação calculados para cada comprimento de linha de costa Δy (Coelho, 2005).

O modelo considera que $Q_{ext} = q_{ext} \Delta y$ e que a variação do volume de areia (ΔV) no comprimento Δy é distribuída uniformemente em toda a largura ativa do perfil transversal, representando uma variação na cota dos pontos do perfil igual a Δz , como representado na Figura 3.1. Através da expressão 3.11 é calcula a alteração vertical, Δz , no perfil transversal representativo do trecho Δy , por variação do volume de areia ΔV (Coelho, 2005).

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(largura\ ativa)\Delta y} \quad (3.11)$$

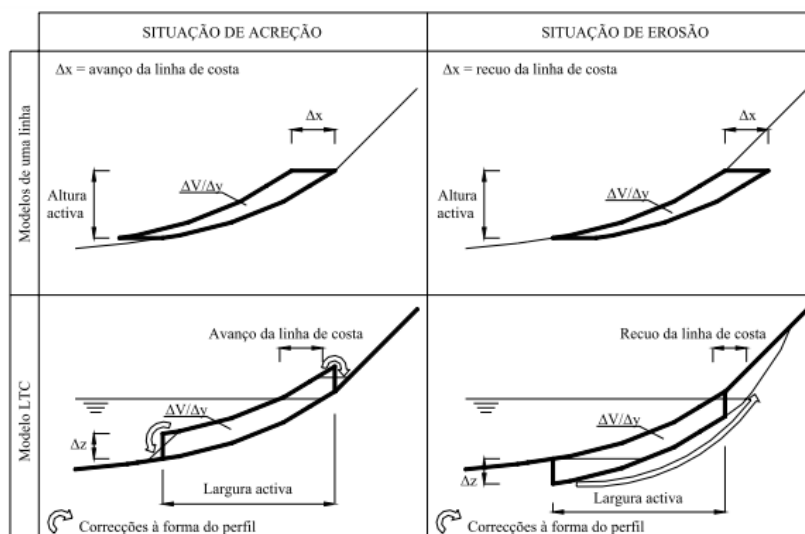


Figura 3.1 - Representação esquemática da formulação base nos modelos de uma linha e o modelo LTC (retirado de Coelho, 2005).

Na Figura 3.1, representa-se aquela que segundo Coelho (2005) é uma das principais diferenças entre o modelo LTC e os modelos de uma linha. Nos modelos de uma linha qualquer ponto do perfil ativo é suficiente para caracterizar a alteração da posição da linha de costa, enquanto no LTC procede-se à variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil ativo, mas procede-se ao ajuste do perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa além de depender de Δz , depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal. Assim, no modelo LTC em situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito que caracteriza as areias, é considerado o deslizamento das areias para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação de sedimentos prolonga a praia, com um declive definido pelo utilizador (pode ser nulo). Em situações de erosão, o volume que aprofundaria o perfil é subtraído da zona mais alta, sendo que, nesta zona, caso existam taludes de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se também o deslizamento, com consequente correção das formas do perfil (Coelho, 2005).

No modelo numérico LTC, o perfil ativo é definido entre a profundidade de fecho e o limite de espraçamento da onda. Nas expressões 3.12 e 3.13 são apresentadas respetivamente as formulações adaptadas de Hallermeier e Birkemeier que o modelo disponibiliza para o cálculo da profundidade de fecho. As formulações de Hallermeier e Birkemeier no modelo numérico LTC foram adaptadas de forma a serem aplicadas diretamente onda a onda para o

cálculo da profundidade de fecho, uma vez que, o modelo assume que cada onda caracterizada pelos parâmetros altura de onda, período de onda e rumo, atua durante um período de tempo (passo de tempo computacional) (Silva, 2010).

$$DoC = 2.28H_0 - 68.5 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \right) \quad (3.12)$$

$$DoC = 1.75H_0 - 57.9 \left(\frac{H_0^2}{gT^2} \right) \quad (3.13)$$

O limite de espraimento da onda é calculado no modelo a partir da expressão 3.14, sendo que, este limite depende do declive da face de praia, $\tan \beta$ (equivalente a m_b na formulação de Kamphuis) e das características das ondas ao largo (Silva, 2010).

$$Ru = 0.27 \sqrt{\tan \beta H_0 L_0} \quad (3.14)$$

O utilizador pode também definir valores constantes para a profundidade de fecho e limite de espraimento.

Como referido, para a aplicação da alimentação artificial de sedimentos o modelo numérico LTC permite ao utilizador definir diferentes distribuições. No entanto, como o modelo estima as características da onda no local onde ocorre a rebentação e, como referido anteriormente, esse local é condicionado pela profundidade $H_b \approx 0.78h_b$, a escolha da posição para a aplicação dos sedimentos deve interferir com a profundidade de rebentação para que os sedimentos provenientes da alimentação artificial sofram o impacto da agitação marítima e sejam distribuídos ao longo da costa (Figura 3.2).

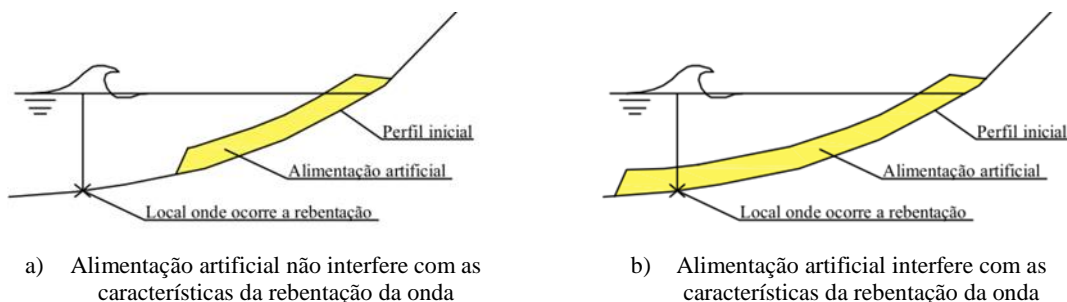


Figura 3.2 - Exemplo da aplicação da alimentação artificial de sedimentos em função do local onde são estimadas as características da rebentação da onda no modelo numérico LTC.

3.2 Cenários modelados e considerações sobre a modelação

Uma vez que o principal objetivo do presente estudo é conhecer e prever o impacto que as alimentações artificiais de sedimentos têm sobre a evolução da morfologia do litoral, foram realizadas várias simulações em que se variaram parâmetros associadas ao transporte sedimentar longitudinal, nomeadamente, o clima de agitação e as condições fronteira da grelha modelada. Todos os cenários foram avaliados numa área de estudo genérica e regular, para melhor controlo do desempenho do modelo.

As modelações incidiram sobre uma região de $5000 \times 20000 \text{ m}^2$ com batimetria regular, analisada sobre uma malha de pontos espaçada de 20 m na direção Este-Oeste e 50 m na direção Norte-Sul. Para facilitar a análise, a direção longitudinal foi dividida em 10 trechos costeiros de 2000 m de comprimento, sendo que, o trecho 1 corresponde ao trecho mais a Sul e o trecho 10 ao trecho mais a Norte da região de estudo (Figura 3.3a). Em cada trecho foi selecionado um perfil transversal localizado a meio da extensão do trecho, considerado representativo desse trecho ao longo do tempo de simulação. Na Figura 3.3b é representada a forma inicial que define o perfil transversal da região modelada.

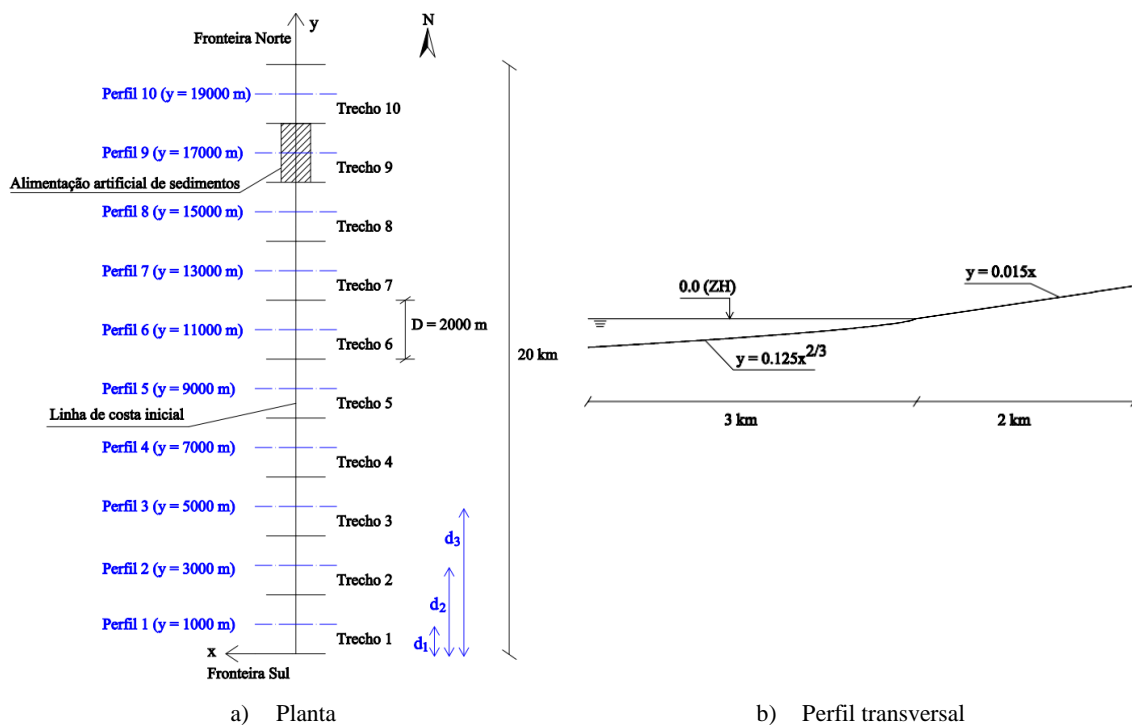


Figura 3.3 - Região de estudo.

Foram gerados 24 cenários de agitação, considerada constante durante todo o período de simulação. Estes cenários conjugam quatro valores de alturas de onda (1 m, 2 m, 3 m e 4 m) com 6 diferentes rumos de proveniência da agitação (60°, 65°, 70°, 75°, 80° e 85° - ângulos da ortogonal da onda com o Norte, definidos no sentido anti-horário).

Relativamente às condições fronteira nos extremos da grelha modelada foram consideradas três situações diferentes. Uma situação em que se considerou um caudal sólido nulo em cada fronteira da grelha modelada (0 m³/h), o que significa que não entram sedimentos a Norte nem saem a Sul, uma situação em que se admitiu uma aproximação às condições de transporte sólido nas zonas vizinhas de ambas as fronteiras e uma situação em que se considerou um caudal nulo no extremo Norte da grelha modelada e no extremo Sul a situação de extrapolação das condições vizinhas. Por simplificação assumiu-se a seguinte nomenclatura para cada combinação de condições fronteira dos extremos da grelha modelada: Fec/Fec para o caso de volume sólido nulo nos dois extremos da grelha modelada (representativa de uma praia encaixada - área fechada); Ext/Ext para as condições fronteira que extrapolam as condições vizinhas nos dois extremos da grelha (ilustrando uma praia aberta); e Fec/Ext para o caso de volume nulo no extremo Norte e extrapolação das condições vizinhas no extremo Sul.

A consideração destas três combinações de condições fronteira pretendeu simular diferentes tipos de praia através de diferentes balanços sedimentares para a mesma célula sedimentar, na perspetiva de perceber qual o impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca nesse balanço. Se não existirem trocas de sedimentos com as células adjacentes, a célula é considerada fechada ao transporte longitudinal. Para o caso de existirem trocas sedimentares com o exterior o modelo numérico LTC recorre à média das condições de transporte sedimentar nos três segmentos de grelha mais próximos. Segundo Coelho (2005) uma célula típica caracteriza-se por uma reduzida fonte de sedimentos a barlar, promontório ou trecho rochoso, e uma fossa submarina a sotamar (absorvendo a areia e conduzindo-a para grandes profundidades), ou um promontório ou trecho rochoso com capacidade de retenção.

A conjugação de cada cenário de agitação marítima (24) com cada uma das condições fronteira (3) perfaz 72 situações distintas, sendo que, cada cenário foi modelado duas vezes, para avaliar o desempenho com e sem a alimentação artificial de sedimentos. Desta forma

os resultados permitem observar os impactos da alimentação artificial sobre a linha de costa quando comparado com a situação natural de evolução do litoral, sem alimentação.

O nível de água e a natureza dos sedimentos foram considerados iguais para todos os cenários modelados, mantendo-se o nível médio da água do mar constante e igual a 0 m ao longo de todas as simulações (Figura 3.3b)

No presente estudo, o cálculo do potencial de transporte sólido longitudinal nos setores costeiros modelados foi realizado com recurso à fórmula de CERC. Para esse cálculo foram definidos os seguintes valores: o coeficiente empírico, k , igual a 0.2; a massa volúmica da água igual a 1027 kg/m^3 ; a massa volúmica da areia igual a 2650 kg/m^3 ; a aceleração da gravidade com o valor de 9.81 m/s^2 ; 0.4 para a porosidade da areia; e 0.78 para o índice de profundidade de rebentação.

Os parâmetros de cálculo relativos ao controlo da evolução dos perfis transversais foram considerados iguais em todas as modelações, com todos os ângulos considerados iguais a 2 graus e optou-se por não efetuar qualquer verificação ou filtragem de cotas na direção longitudinal. As modelações foram realizadas para um período total de 5 anos (43800 horas), obtendo-se saídas gráficas anuais compatíveis com o objetivo inicial de se prever e analisar a distribuição dos sedimentos ao longo do litoral. O passo de tempo computacional considerado foi de uma hora.

Nas modelações em que se considerou a operação de alimentação artificial de sedimentos assumiu-se uma alimentação única com volume igual a $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ e que a realização da operação duraria dez meses (7200 horas), iniciando-se com o início da modelação. O local de colocação da alimentação foi definido próximo do extremo Norte da grelha modelada, trecho 9 segundo a divisão da linha de costa exposta na Figura 3.3a, preenchendo-se todo o perfil ativo da praia, o que perfaz uma área abrangida por adição artificial de sedimentos de $1640 \times 2000 \text{ m}^2$.

O perfil ativo de praia, como já referido, é dependente do limite de espriamento e da profundidade de fecho, sendo um importante parâmetro na avaliação da evolução morfológica do litoral, uma vez que, é neste perfil que se verificam variações significativas da batimetria. Nas modelações realizadas optou-se por definir valores constantes para estes

parâmetros, independentemente do clima de agitação simulado, impondo-se uma profundidade de fecho e limite de espraçamento de -15 m (ZH) e +5 m (ZH), respetivamente.

Todas as condições definidas tiveram a intensão de ser próximas e representativas da realidade do litoral Noroeste português.

3.3 Metodologia

A alimentação artificial de sedimentos conduz a um volume extra de sedimentos que serão distribuídos ao longo do litoral por ação da dinâmica sedimentar que ocorre no local onde é realizada a operação. Essa dinâmica, dependente da ação das ondas, vai definir como acontece o transporte de sedimentos e, consequentemente como ocorre a evolução morfológica do litoral. Assim, de forma a tentar perceber como ocorre a distribuição espacial e temporal do volume extra de sedimentos induzido pela alimentação artificial, numa primeira fase, procedeu-se à avaliação da variação da topo-hidrografia da zona de estudo e ao impacto que a alimentação artificial de sedimentos tem sobre a evolução da linha de costa. Estes elementos construíram a base da fase seguinte do estudo, destinada a analisar e a prever a posição do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo e a velocidade de transporte que lhe está associada.

O estudo do impacto da alimentação artificial de sedimentos na região modelada foi realizado através da quantificação do volume de sedimentos que a realização da alimentação induz em cada trecho costeiro e da quantificação do ganho ou perda de área em planta. A estimativa do volume e área por trecho costeiro foi realizada utilizando-se os ficheiros de resultados fornecidos pelo modelo numérico LTC relativos aos perfis transversais, evolução da linha de costa e elevação final (batimetria e topografia) da região em estudo. Para a avaliação do efeito do volume de sedimentos introduzidos pela alimentação artificial os valores da situação de evolução natural da linha de costa foram subtraídos aos valores da situação em que se considerou a alimentação artificial. Desta forma identificou-se o impacto da alimentação.

Para a análise das variações da topo-hidrografia da região de estudo foram utilizadas as potencialidades do *software* ArcGIS 10.3 na criação de mapas para representar a variação

de elevação da região em estudo entre dois instantes de tempo diferentes. Estes mapas complementam a análise anterior e permitem uma avaliação rápida e intuitiva da distribuição dos sedimentos na zona costeira.

3.3.1 Volume de sedimentos

O volume de sedimentos induzido pela alimentação artificial em cada trecho costeiro foi quantificado através da expressão 3.15.

$$\Delta V_i = \Delta A_i \times D \quad (3.15)$$

Em que ΔA_i corresponde à área do perfil transversal, estimada através da diferença entre o perfil sem alimentação e com alimentação, e D representa o comprimento do trecho costeiro (2000 m). Esta abordagem representa uma simplificação pois verifica-se que nem sempre o perfil transversal é completamente representativo do comportamento do trecho. Na Figura 3.4 é ilustrada uma dessas situações observando-se que o perfil transversal ainda apresenta a configuração inicial e uma parte do trecho onde se encontra inserido o perfil, apresenta uma zona onde já ocorre acreção.

Além das condições nas fronteiras da área modelada, a única fonte de sedimentos é a alimentação artificial, pelo que, pela equação da continuidade, o somatório dos volumes induzidos pela alimentação em cada trecho é igual à soma do volume da alimentação artificial (Vol_{AA}) com o volume de sedimentos que entra no extremo da grelha modelada (Vol_{in}), subtraído do volume que sai da grelha (Vol_{out}), expressão 3.16.

$$\sum_{i=1}^{10} \Delta V_i = Vol_{in} + Vol_{AA} - Vol_{out} \quad (3.16)$$

Para avaliar a sensibilidade dos resultados à estimativa de volumes diminui-se o espaçamento entre perfis transversais (250 e 500 m) e utilizou-se as potencialidades do *software* ArcGIS (ferramenta *Cut/Fill*). A análise comparativa dos resultados obtidos através das diferentes abordagens permitiu constatar que não existem grandes discrepâncias para os

valores dos volumes, concluindo-se que o espaçamento de 2000 m entre perfis transversais é representativo da distribuição de sedimentos ao longo da costa.

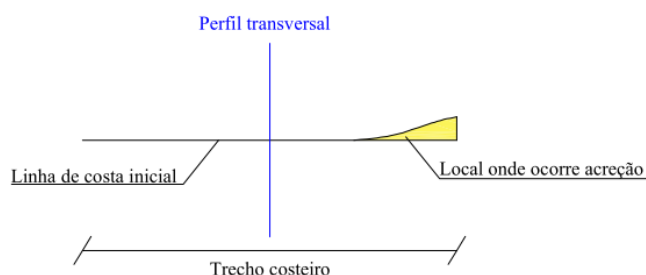


Figura 3.4 - Metodologia para o cálculo dos volumes.

A título de exemplo, na Tabela 3.1 são apresentados os volumes totais (somatório dos volumes por trecho) obtidos para as diversas abordagens descritas. O cenário escolhido corresponde a 1 ano de modelação, em que se considerou a extrapolação das condições fronteira em ambos os extremos da grelha modelada, altura de onda de 1 m e rumo de proveniência da onda de 60°. A análise comparativa dos resultados permite constatar que há uma variação de cerca de 10% entre os resultados obtidos. Associada à análise de sensibilidade realizada para a estimativa de volumes, os resultados permitem verificar que não se identificam na área modelada os $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos induzidos pela alimentação artificial (perda de 20 a 30% dos sedimentos). Este facto pode estar relacionado com o cálculo dos volumes, ou com a formulação e distribuição transversal dos sedimentos no próprio modelo numérico, uma vez que, não é verificada a equação da continuidade. No entanto, como o comportamento é comum aos diversos cenários modelados, considera-se que a avaliação qualitativa e comparativa de cenários contribui para o conhecimento da distribuição dos sedimentos após a alimentação artificial.

Tabela 3.1 - Estimativa do volume de sedimentos ao fim de um ano de simulação, em função da abordagem de cálculo ($\times 10^6 \text{ m}^3$).

Distância entre perfis transversais (D)			ArcGIS
250 m	500 m	2000 m	
3.77	3.91	3.54	3.71

3.3.2 Centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos

A posição do centro de gravidade dos sedimentos que resultam da alimentação artificial, definida na direção da linha de costa foi avaliada através da expressão 3.17. A posição foi estimada ano a ano, do 1º ao 5º ano de simulação, para cada cenário, permitindo conhecer a posição do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos em 5 instantes de tempo diferentes.

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta A_i d_i}{\sum_{i=1}^{10} \Delta A_i} \quad (3.17)$$

A distância d_i representa a distância entre o perfil transversal i e o ponto localizado mais a Sul da região modelada, como representado na Figura 3.3a.

3.3.3 Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos

Conhecida a posição do centro de gravidade da alimentação em dois instantes de tempo diferentes determinou-se a diferença relativa entre a sua posição (expressão 3.18), sendo a velocidade de transporte dos sedimentos que resultam da alimentação artificial estimada através da expressão 3.19, permitindo determinar a velocidade média de transporte em quatro intervalos de tempo (intervalos de um ano).

$$\Delta G = X_{G_{t+1}} - X_{G_t} \quad (3.18)$$

$$v_G = \frac{\Delta G}{\Delta t} \quad (3.19)$$

A velocidade média de transporte dos sedimentos da alimentação artificial, no tempo total de simulação de cada cenário, foi obtida pela média dos quatro valores de velocidade anual (expressão 3.20).

$$\overline{v_G} = \frac{\sum_{t=1}^4 (X_{G_{t+1}} - X_{G_t})}{4} \quad (3.20)$$

3.3.4 Procedimento ArcGIS 10.3

Através dos resultados fornecidos pelo modelo numérico LTC, utilizou-se o ArcGIS 10.3 para modelar a configuração da superfície inicial e final do terreno, para todos os cenários com e sem ser realizada a operação de alimentação artificial de sedimentos. Desta forma obtiveram-se representações gráficas do impacto da alimentação artificial de sedimentos na elevação da área modelada e nos volumes de areia ganha ou perdida.

O *software* disponibiliza um vasto conjunto de ferramentas que realizam diferentes tipos de interpolação para a criação da superfície do terreno. Foram testados diferentes tipos de interpolação. Triangulação através da ferramenta *Create Tin (Triangular Irregular Networks)*, interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*) que interpola uma superfície a partir de pontos usando a técnica da distância inversa ponderada e a interpolação de *Kriging*, sendo que, esta técnica de interpolação serve-se de diversas teorias de estatística (ArcGIS 10.3 Help Library, 2016). Face aos diferentes resultados obtidos em função do tipo de interpolação, a opção para se realizar a modelação do terreno recaiu sobre a ferramenta *Create Tin (Triangulated Irregular Network)*. Esta ferramenta cria um modelo digital a partir de curvas de nível e/ou pontos cotados, sendo que, os valores de altitude são obtidos através de triangulação (ArcGIS 10.3 Help Library, 2016).

Para se obter a representação do impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca na elevação do terreno utilizou-se a ferramenta *Minus* do *ArcGIS Spatial Analyst*. Através desta ferramenta os valores da superfície final do terreno sem alimentação foram subtraídos aos valores da superfície final com alimentação (ArcGIS 10.3 Help Library, 2016).

A diferença de volumes de areia ganha ou perdida nos diversos instantes de tempo analisados devido à realização da alimentação artificial de sedimentos foi determinada através da ferramenta *Cut/Fill* do *ArcGIS Spatial Analyst*. Esta ferramenta usa duas superfícies da mesma região em períodos de tempo diferentes (inicial e final), e cria uma superfície de regiões onde identifica as áreas onde houve deposição de material, remoção, ou não houve alterações da superfície. Assim, através da superfície final do terreno sem alimentação e da superfície final do terreno com alimentação, gerou-se uma superfície que identifica os volumes de areia provenientes da alimentação artificial de sedimentos. Associada à superfície gerada pela ferramenta *Cut/Fill* é criada uma tabela de atributos da superfície onde se pode consultar o volume de material ganho ou perdido (ArcGIS 10.3 Help Library, 2016).

Capítulo 4

**DISTRIBUIÇÃO DOS SEDIMENTOS DA
ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL**

4 DISTRIBUIÇÃO DOS SEDIMENTOS DA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

No presente capítulo são apresentados os resultados da simulação da alimentação artificial de sedimentos, avaliados pela distribuição do volume de sedimentos em cada trecho costeiro e pelos ganhos ou perdas de área de território. Sob o pressuposto que o modelo numérico LTC não é sensível aos processos de transporte transversal, os resultados permitem perceber o impacto da alimentação avaliado através da fórmula CERC, por comparação dos resultados obtidos para os diferentes cenários de altura de onda e rumos de proveniência da agitação marítima. Assim, avalia-se o impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca na orientação da linha de costa e consequentemente no ângulo de incidência das ondas e na propagação de sedimentos ao longo do litoral.

Os resultados apresentados permitem analisar como a distribuição de sedimentos e as áreas em planta evoluem nos trechos costeiros. Em geral, os comportamentos observados por trecho costeiro são similares, sendo função das condições de agitação marítima e condições fronteira dos extremos da área modelada.

4.1 Impacto da altura de onda

Na sequência dos resultados obtidos verifica-se que a altura de onda considerada tem um impacto significativa na distribuição dos sedimentos da alimentação artificial. Os resultados indicam que quanto maior é a altura de onda, para o mesmo rumo de proveniência da agitação, mais cedo os trechos localizados a Sul sentem o efeito da alimentação artificial de sedimentos, sendo que, esse efeito se traduz em ganho de volume de sedimentos e ganho de área em planta. Observa-se que para as menores alturas de onda a alimentação provoca efeitos benéficos nos trechos costeiros, quer em termos de robustez do perfil (volumes), quer em termos de área em planta. Com o aumento da altura de onda a dispersão dos sedimentos é maior fazendo com que em alguns trechos costeiros os benefícios comecem a diminuir, tendendo a desaparecer o efeito benéfico da alimentação. Como exemplo, na Figura 4.1 ilustra-se o impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca na morfologia da região em análise, materializado através das diferenças altimétricas, em função da altura de

onda, para o mesmo tempo de simulação, 5 anos, condições fronteira de extrapolação nos dois extremos da grelha modelada e rumo de proveniência da agitação marítima de 60° com a linha de costa.

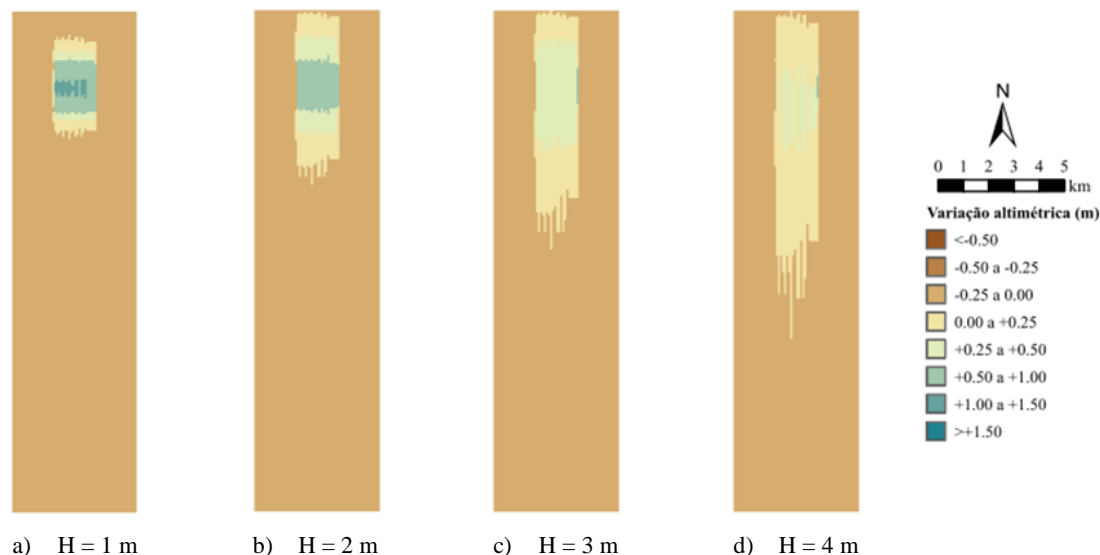


Figura 4.1 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, ao fim de 5 anos de simulação, em função da altura de onda ($\alpha = 60^\circ$; Ext/Ext).

4.2 Impacto da orientação da onda

O rumo de proveniência da agitação marítima condiciona a forma como os sedimentos são distribuídos. Os resultados obtidos indicam que os trechos mais a Sul começam a apresentar benefícios da alimentação mais cedo e em maior grandeza, quanto mais próximo da perpendicular à linha de costa é o rumo de proveniência das ondas. O modelo também apresenta uma evolução da linha de costa mais suave em toda a extensão, para os rumos de incidência mais próximos da perpendicular à linha de costa. Por esse efeito, nas zonas mais afastadas dos extremos da área modelada a linha de costa está mais avançada, representando ganho de território. Como exemplo, na Figura 4.2 ilustra-se a configuração da linha de costa em planta, para as diferentes alturas de onda, no 5º ano de simulação e condições fronteira de extrapolação nos dois extremos da grelha, em função do rumo de proveniência da agitação. Na Figura 4.3 apresenta-se o impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia da região em análise em função do rumo de proveniência da agitação, para a altura de onda de 4 m.

Em anexo, são apresentados os resultados do impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia da região em estudo para todos os cenários simulados.

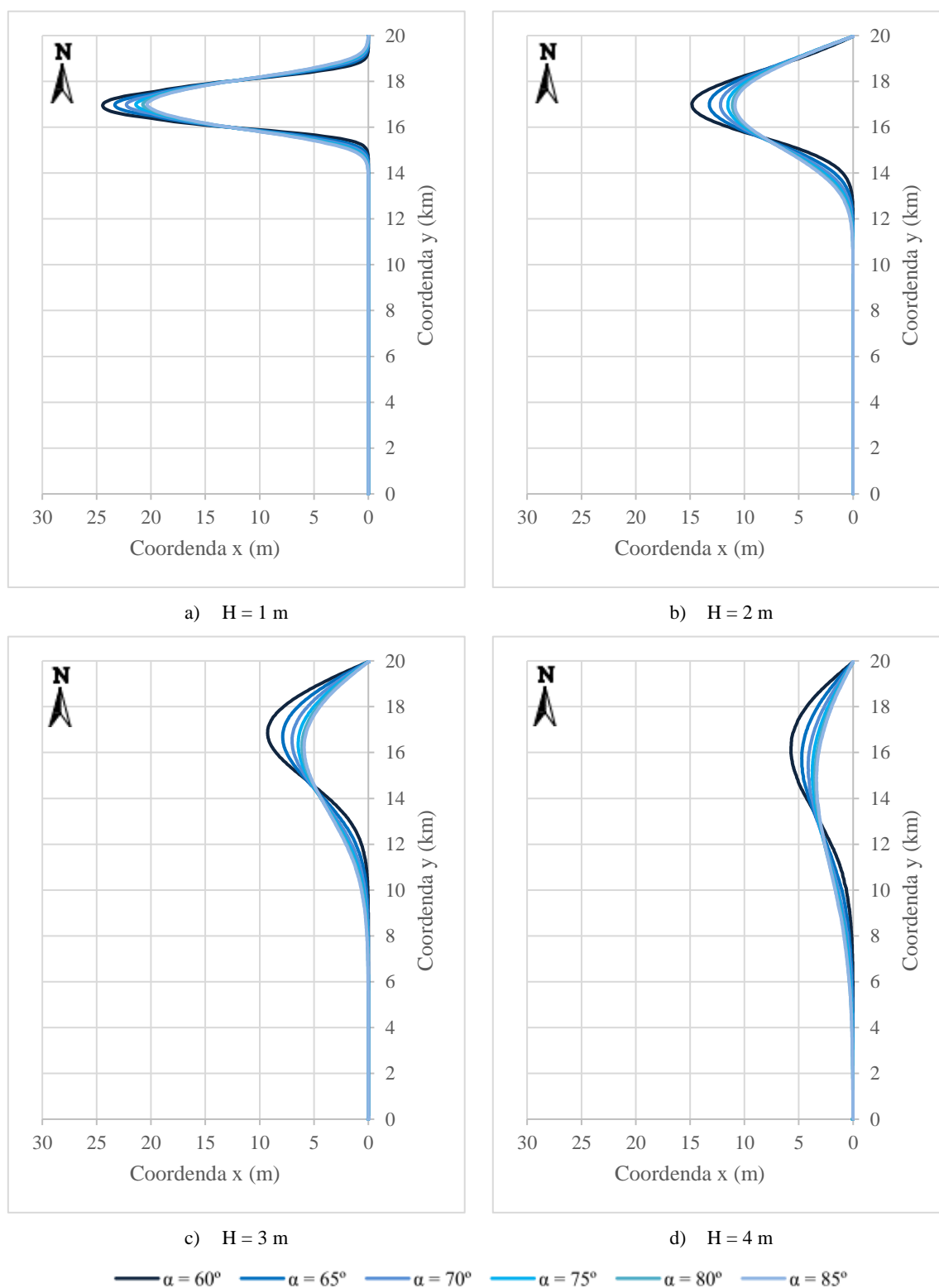


Figura 4.2 - Configuração da linha de costa em planta para as diferentes alturas de onda, em função do rumo de proveniência da agitação (5º ano de simulação; Ext/Ext)

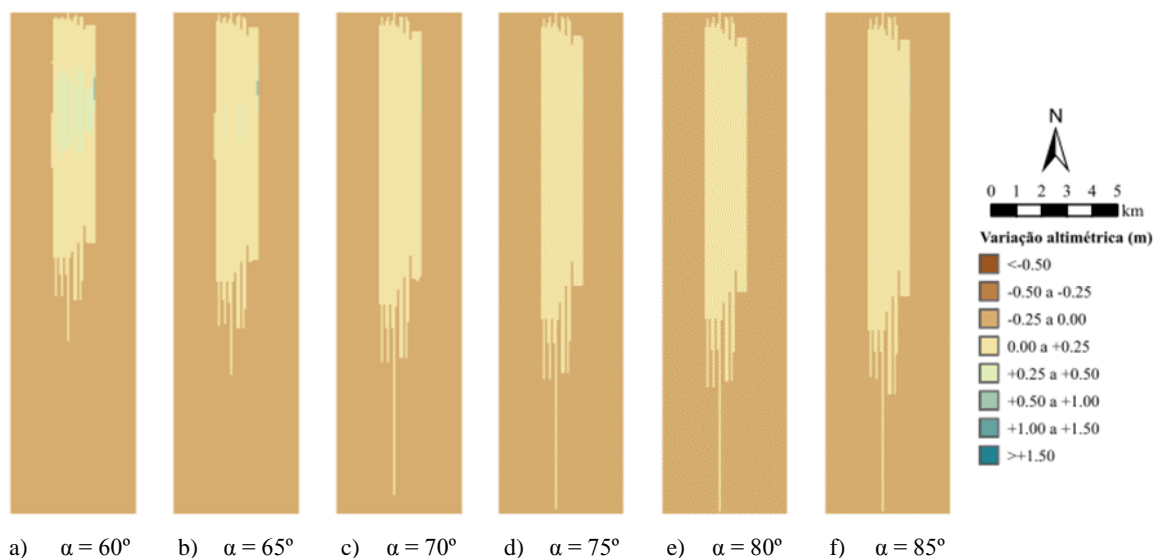


Figura 4.3 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, ao fim de 5 anos de simulação, em função do rumo de proveniência da agitação marítima ($H = 4$ m; Ext/Ext).

4.3 Impacto das condições fronteira

Atentando ao impacto que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca por trecho costeiro, quer em termos de volume, quer em termos de área em planta, é possível concluir que a realização da alimentação tem um impacto benéfico sobre a região modelada, sendo que, esse impacto também se faz sentir na zona localizada a barlar do local onde foi realizada a alimentação artificial de sedimentos (trecho 10). Em geral, nos trechos localizados mais a Sul o impacto da alimentação é, para grande parte dos cenários simulados, significativamente inferior ao impacto que tem nos trechos localizados a Norte.

A distribuição dos sedimentos e, conseqüentemente, os trechos que apresentam benefícios da alimentação artificial é condicionada pelo tipo de praia, ou seja, pelas condições fronteira da grelha modelada, em que é realizada a adição artificial de sedimentos. No entanto, o impacto que a consideração de diferentes condições fronteira provoca na distribuição dos sedimentos é dependente das características da agitação marítima.

Para os climas de agitação menos energéticos, alturas de onda de 1 e 2 m, constata-se que o tipo de praia em que é realizada a alimentação artificial não condiciona os trechos que apresentam benefícios da alimentação. Assim, para as três situações de condições fronteira testadas e alturas de onda de 1 e 2 m, o impacto da alimentação apenas se manifesta nos trechos localizados mais a Norte, sendo que, os trechos que ao fim de 5 anos apresentam

benefícios da alimentação artificial, quer em termos de área em planta, quer em termos de volume, são os mesmos. Para a onda de 1 m deteta-se a distribuição dos sedimentos em planta nos trechos 7 a 10 e ganhos no perfil transversal médio dos trechos 8 a 10. Para a onda de 2 m de altura, o efeito da alimentação estende-se para sotamar até ao trecho 5 (área em planta), sendo observados ganhos no perfil médio do trecho 6.

Com o aumento da altura de onda o impacto da alimentação artificial alonga-se ainda mais para sotamar, sendo que, o trecho mais a Sul a sofrer o impacto da alimentação passa a ser condicionado pelas condições fronteira da grelha modelada. Verifica-se que no caso de praias confinadas (condições fronteira fechada nos dois extremos da grelha modelada), para as ondas de 3 e 4 m de altura todos os trechos registam o impacto positivo da alimentação artificial. Para os outros dois casos de condições fronteira e altura de onda de 3 m, o trecho 4 é o trecho localizado mais a Sul que apresenta impacto da alimentação em termos de robustez do perfil e o trecho 3, em termos de área em planta. Para a onda de 4 m de altura, todos os trechos a partir de determinado rumo de proveniência da agitação marítima apresentam impacto da alimentação artificial de sedimentos.

Para as alturas de onda de 3 e 4 m, a diferença observada e descrita sobre o trecho mais a Sul que apresenta impacto da alimentação, em função das condições fronteira da grelha modelada, justifica-se pelo facto de não existirem trocas sedimentares com o exterior no extremo Sul da grelha modelada quando esse extremo está sujeito a uma fronteira fechada. Apesar da descrição apresentada indicar que para os climas de agitação mais energéticos todos os trechos da região modelada apresentam impacto da alimentação, observam-se diferenças significativas na ordem de grandeza do impacto entre trechos, quer em termos de áreas em planta, quer em termos de evolução do perfil transversal médio.

4.3.1 Fronteira Norte

Na zona Norte da região modelada verifica-se que o facto de existirem ou não trocas sedimentares com o exterior tem uma importância significativa no impacto que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca. Essa importância materializa-se através da comparação dos resultados obtidos para cada caso de condições fronteira dos extremos da grelha modelada.

A nível de volumes o impacto da alimentação a Norte é idêntico para os três casos de condições fronteira analisados, observando-se que a alimentação conduz a um aumento do volume de sedimentos. A nível de áreas em planta os resultados indicam que nas simulações em que se considera fronteira fechada no extremo Norte a alimentação artificial de sedimentos provoca um impacto significativamente maior no ganho de área, quando comparado com o impacto na situação da fronteira Norte estar sujeita a extrapolação com as condições vizinhas. No cenário de não ser realizada alimentação artificial de sedimentos, a linha de costa quando não alimentada a Norte (fronteira fechada), apresenta um recuo significativo que não ocorre quando a fronteira é definida com extrapolação com as condições vizinhas. Como exemplo, na Figura 4.4 comparam-se as linhas de costa entre as condições fronteira Fec/Fec e Ext/Ext no cenário de não ser realizada a alimentação artificial de sedimentos, para diferentes valores de altura de onda, considerando o rumo de proveniência da agitação de 60° no 5º ano de simulação.

Desta forma, os resultados obtidos refletem que a realização da alimentação artificial produz dois tipos de efeitos. Nos cenários em que não ocorre perda de território, caso de condição fronteira de extrapolação no extremo Norte, o impacto da alimentação artificial apesar de não se refletir tão significativamente no ganho de área em planta, reflete-se no aumento da robustez do perfil. No caso de existir perda de território, caso de condição fronteira fechada no extremo Norte, para além de provocar um significativo impacto em termos de ganho de área em planta, provoca aumento da robustez do perfil. Esta constatação fica evidenciada quando se compara o impacto da alimentação artificial na morfologia da região em termos de variação altimétrica, para o mesmo clima de agitação e diferentes condições fronteira. A título de exemplo na Figura 4.5 compara-se a variação altimétrica da região em análise em função das condições fronteira, em dois instantes de simulação, altura de onda de 4 m e rumo de proveniência da agitação de 85°. Da análise dessa figura verifica-se que, comparando o mesmo tempo de simulação, para os dois casos de condições fronteira a variação altimétrica no mesmo local sugere o mesmo padrão de comportamento.

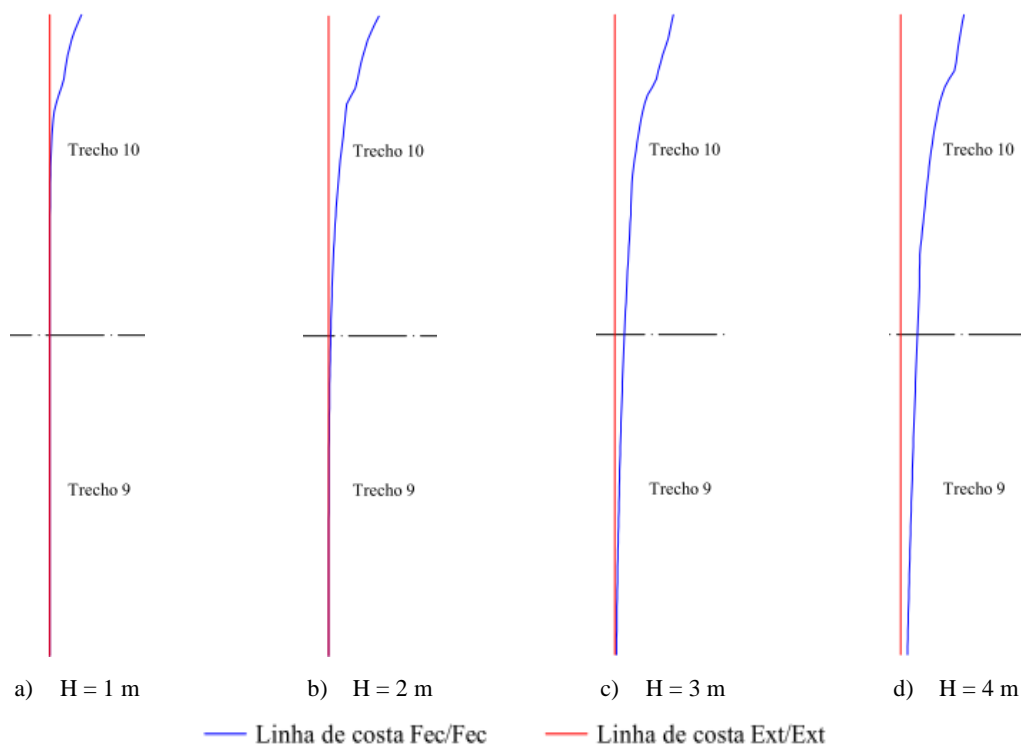


Figura 4.4 - Posição das linhas de costa ao fim de 5 anos, no cenário de não ser realizada alimentação artificial de sedimentos ($\alpha = 60^\circ$).

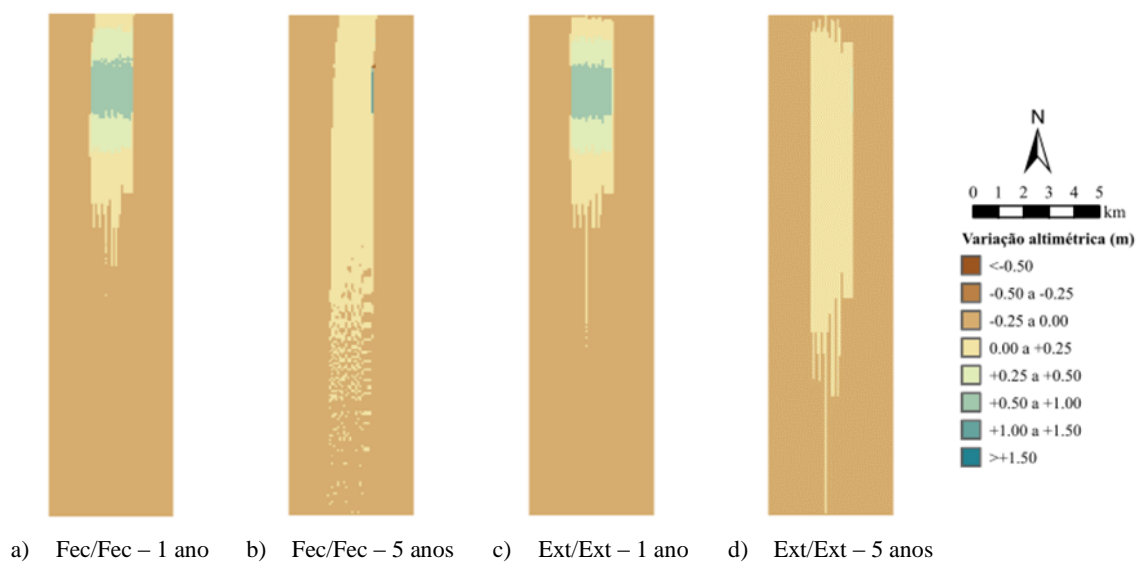


Figura 4.5 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia, em função das condições fronteira ($H = 4$; $\alpha = 85^\circ$).

4.3.2 Fronteira Sul

Salvo algumas exceções, verifica-se que a alimentação artificial produz um impacto positivo e da mesma ordem de grandeza na zona Sul da região modelada, para os três casos de condição fronteira analisados. As exceções observadas referem-se a situações em que o impacto da alimentação artificial nos trechos a Sul, nomeadamente trechos 1 e 2, é significativamente maior quando a fronteira Sul é fechada, pois não existem troca de sedimentos com o exterior e por isso os sedimentos ficam retidos nessa fronteira.

Pontualmente e de forma pouco significativa verifica-se que o efeito da alimentação artificial de sedimentos não se faz sentir positivamente no trecho 1, o que pode estar relacionado com a forma como a linha de costa evolui após ser realizada a alimentação. Nesses casos os sedimentos podem ser transportados mais lentamente para os trechos vizinhos após a alimentação artificial de sedimentos, por comparação com o volume de sedimentos que atingia esses trechos na situação de evolução da linha de costa sem alimentação. Na Figura 4.6 ilustra-se a comparação de evolução da linha de costa no tempo para o trecho 1, para um cenário de altura de onda de 4 m e rumo de proveniência da agitação de 70° em que se registou no 3º ano de simulação um valor de área negativa no trecho 1.

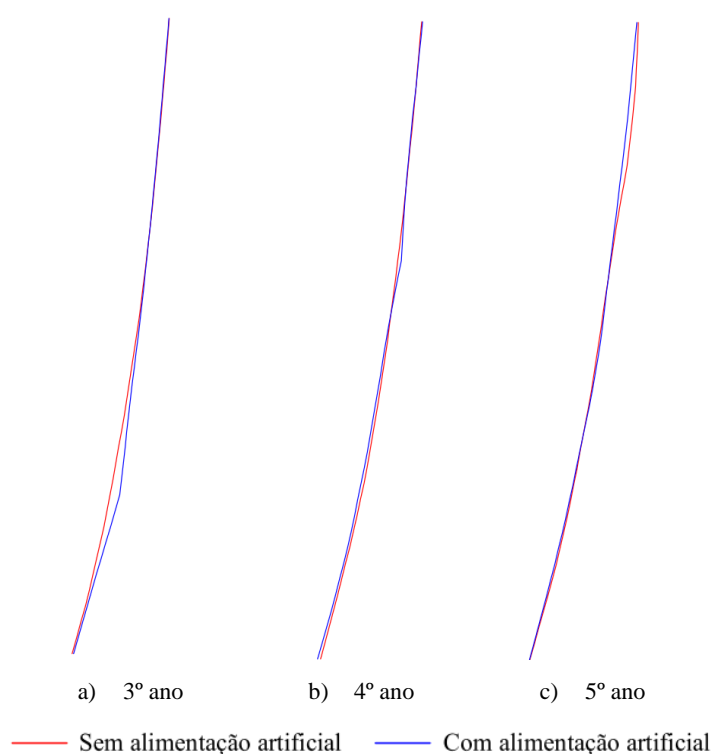


Figura 4.6 - Posição das linhas de costa no trecho 1 em diferentes tempos de simulação e condições fronteira da grelha modelada de Fec/Fec ($H = 4$ m; $\alpha = 70^\circ$).

4.4 Análise no tempo

Na presente subsecção são apresentados os resultados do impacto que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca quer em termos de volumes, bem como em áreas em planta, em função do tempo.

Os resultados obtidos permitem verificar que o impacto da alimentação artificial se vai diluindo no tempo, observando-se que os sedimentos são distribuídos na direção a sotamar, mas também a região localizada a barlar do local onde foi depositada a alimentação artificial apresenta benefícios da alimentação (trecho 10). Como exemplo do impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca na região modelada, nas Figuras 4.7 e 4.8 comparam-se ao longo do tempo os benefícios em termos de área e volume nos trechos costeiros, entre uma praia encaixada (Fec/Fec) e uma praia aberta (Ext/Ext), em função da altura de onda e rumo de proveniência da agitação de 85° com a linha de costa. Os resultados obtidos para a condição fronteira Fec/Ext nos trechos a Norte assemelham-se aos obtidos para a situação Fec/Fec e nos trechos a Sul assemelham-se à situação Ext/Ext.

A análise dos benefícios que a alimentação artificial de sedimentos provoca por trecho costeiro, quer em termos de volume, quer termos de área em planta, em função do tempo, permite verificar que ocorrem maioritariamente dois tipos de comportamento. Os trechos vão aumentando sucessivamente os benefícios da alimentação no tempo ou os trechos, após atingirem um benefício máximo registam uma tendência de diminuição do benefício ao longo do tempo. Em geral os trechos localizados mais a Sul vão aumentando sucessivamente o efeito benéfico ao longo dos 5 anos de simulação. O comportamento de perda de benefício da alimentação ao fim de algum tempo ocorre nos trechos localizados mais a Norte e está geralmente associado aos climas de agitação mais energéticos. Como exemplo, na Figura 4.9 apresenta-se o acréscimo de volume de sedimentos dos diferentes trechos costeiros em função do tempo, no cenário de altura de onda de 3 m e extrapolação com as condições vizinhas nos dois extremos da grelha modelada. O comportamento de evolução por trecho costeiro das áreas em planta é idêntico ao ilustrado para os volumes.

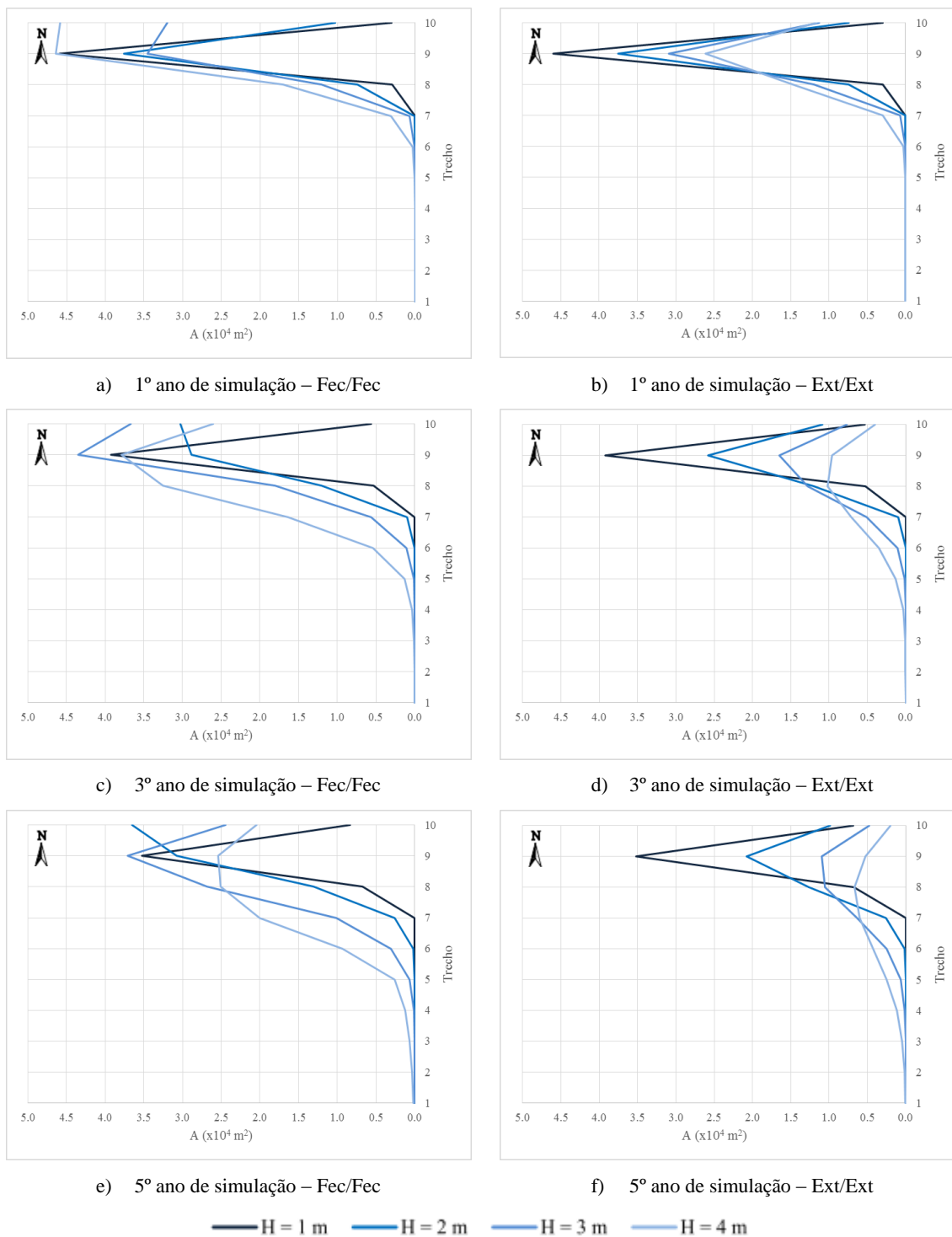


Figura 4.7 - Impacto da alimentação artificial em termos de área nos trechos costeiros, em diferentes instantes de simulação e para diferentes condições fronteira ($\alpha = 85^\circ$).

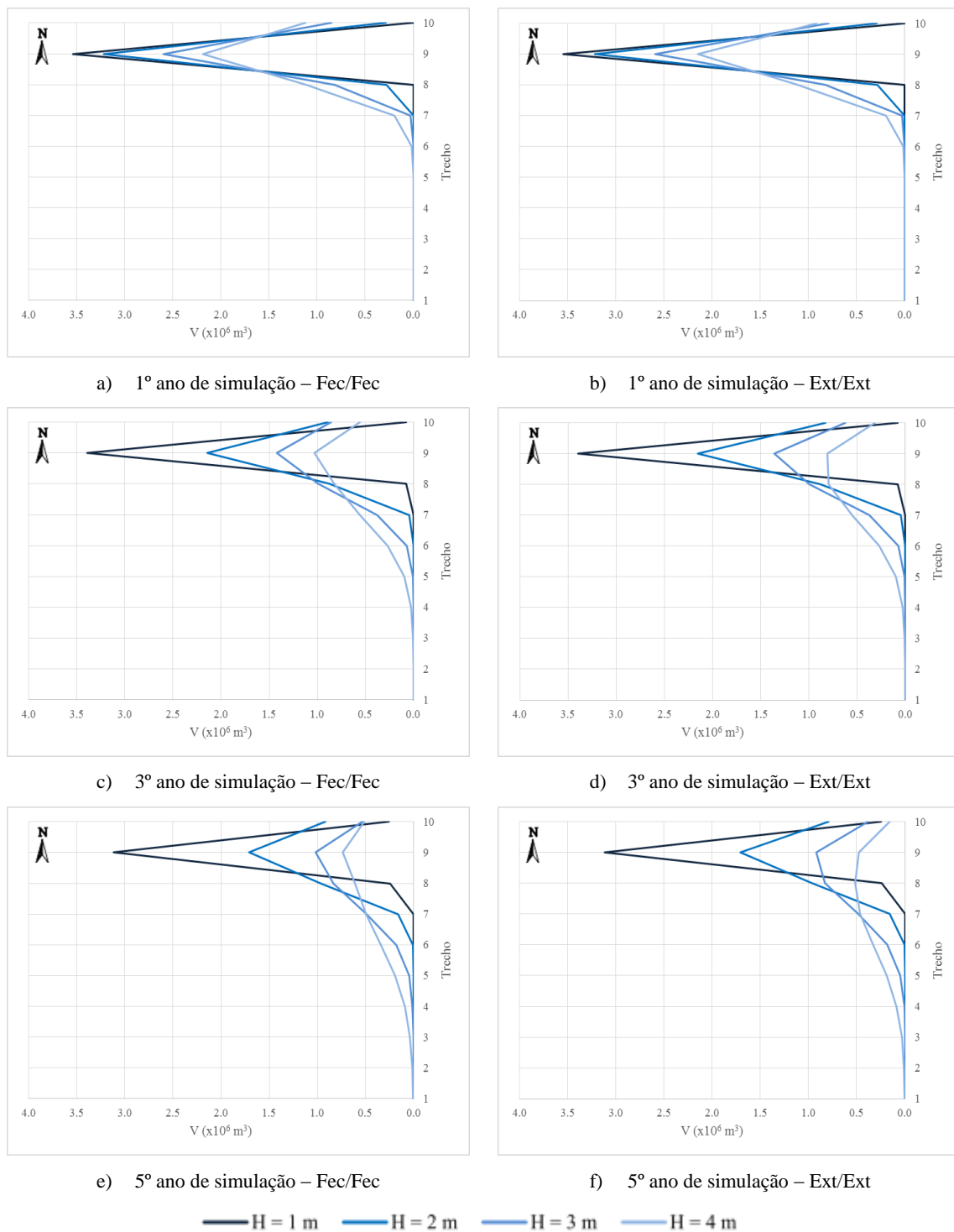
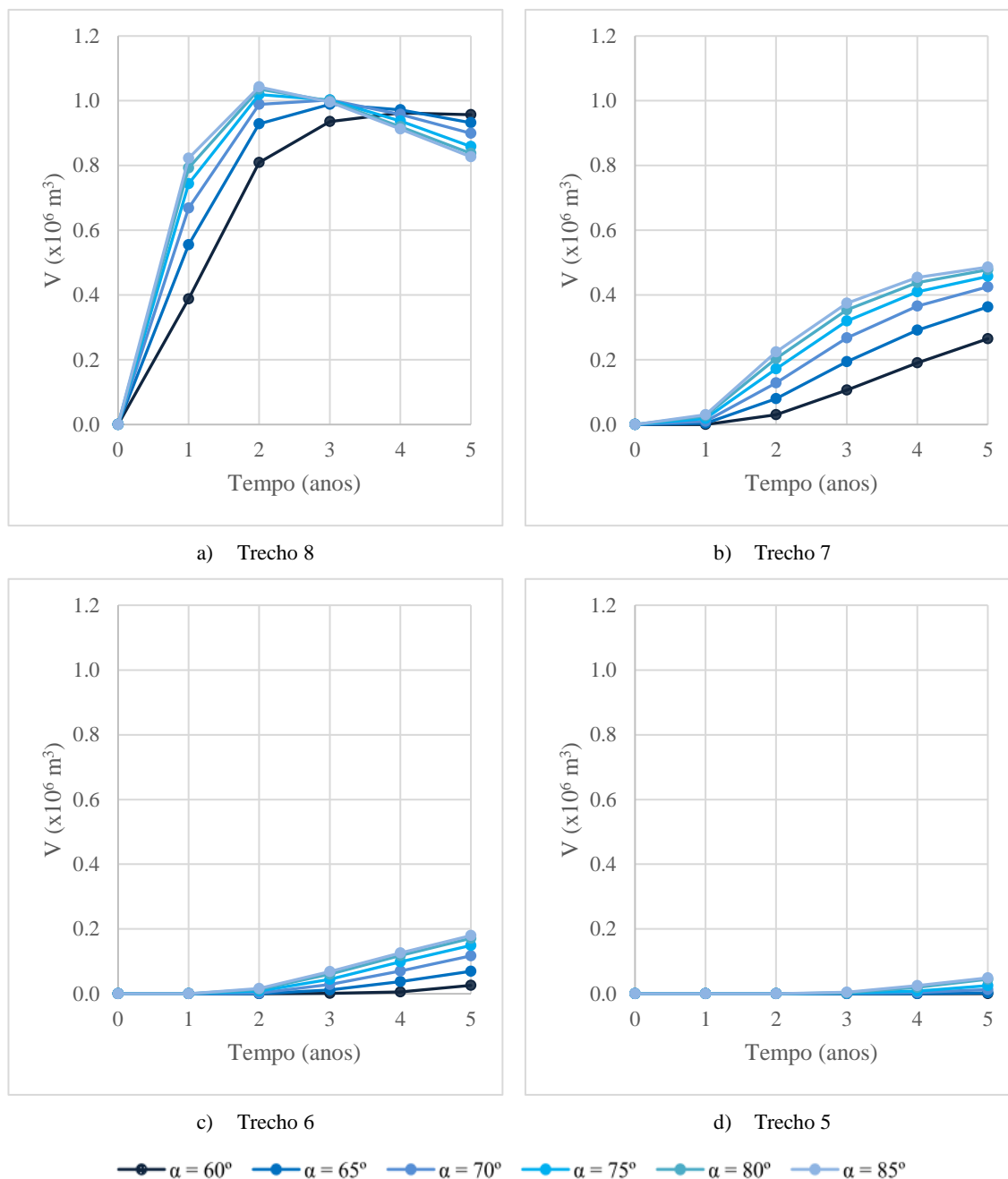


Figura 4.8 - Impacto da alimentação artificial em termos de volumes nos trechos costeiros, em diferentes instantes de simulação e para diferentes condições fronteira ($\alpha = 85^\circ$).


 Figura 4.9 - Volume de sedimentos em função do tempo em cada trecho costeiro ($H = 3 \text{ m}$; Ext/Ext).

Os trechos 8, 9 e 10 são os que apresentam comportamentos mais distintos no tempo. No trecho 9 esses comportamentos devem-se ao facto de ser o trecho em que se realizou a alimentação artificial. Nos trechos 8 e 10 o comportamento é justificado pela proximidade ao trecho 9. Por esse motivo, procede-se a uma análise mais particularizada da evolução do volume de sedimentos e áreas em planta nesses trechos.

Nos trechos 10 e 8, trechos localizados respetivamente a barlamar e sotamar do local onde foi realizada a alimentação artificial de sedimentos, os resultados indicam que para os climas de agitação menos energéticos os dois trechos apresentam uma evolução análoga de benefícios, quer a nível de volumes, quer a nível de áreas em planta (Figuras 4.10 e 4.11, respetivamente, para as condições fronteira fechadas nos dois extremos). Para as alturas de onda de 1 e 2 m os dois trechos (10 e 8) aumentam sucessivamente o seu volume e área no tempo em todos os cenários modelados (Figuras 4.10a, 4.10b, 4.11a e 4.11b). Este aumento no tempo pode ser justificado pelo facto do clima de agitação ser pouco energético e por isso, o volume total da alimentação não é transportado para os trechos mais a Sul, sendo portanto o impacto da alimentação mais significativo na zona Norte.

Para as condições de agitação mais energéticas, a nível de volumes os dois trechos, 10 e 8, continuam a apresentar um comportamento idêntico, registando-se uma inversão no aumento do ganho ao fim de algum tempo, passando o ganho a ser menor. Essa inversão é influenciada pelos rumos de proveniência da agitação, sendo observada para os três tipos de condições fronteira analisados. Este menor ganho de volume ao fim de algum tempo, após ser atingido um volume máximo, justifica-se pelo facto de se observar que é para as maiores alturas de onda que os trechos a Sul apresentam impacto da alimentação artificial de sedimentos.

A nível de evolução das áreas em planta, os trechos 10 e 8 apresentam comportamentos distintos para as alturas de onda de 3 e 4 m. No trecho 10 os resultados indicam que o trecho apresenta um ganho máximo de área, que depois diminui no tempo, sendo este comportamento observado para estas alturas de onda, para a maioria dos rumos de proveniência da agitação e nos três casos de condições fronteira analisados (Figuras 4.10c e 4.10d). Este comportamento pode ser justificado pelo facto de se observar que ao fim de algum tempo de simulação, no trecho 10, a linha de costa no caso de ser realizada a alimentação artificial se aproxima da configuração que apresenta no caso de evolução sem alimentação (Figura 4.12). Esta constatação poderá indicar que o efeito benéfico da alimentação artificial a barlamar do local onde foi efetuada a deposição tenderá a desaparecer. Ainda sobre o trecho 10, da análise da Figura 4.10, também se verifica que o impacto da alimentação em termos de área em planta é maior para os rumos de proveniência da agitação mais próximos da perpendicular à linha de costa, sendo que, isto também ocorre neste trecho para os outros dois casos de condições fronteira analisados e para os volumes no trecho. A justificação para este comportamento poderá estar relacionada com o facto de

se observar que o modelo assume para a configuração da linha de costa em planta uma evolução mais suavizada para os rumos de proveniência da agitação marítima mais próximos da perpendicular à linha de costa. Como exemplo, na Figura 4.13 apresenta-se a comparação da evolução da linha de costa, para diferentes rumos de proveniência da agitação, altura de onda de 3 m e condições fronteira fechadas nos dois extremos da grelha no 4º ano de simulação.

No trecho 8 observa-se que o ganho de área no tempo, para a altura de onda de 3 m, é dependente das condições fronteira dos extremos da grelha modelada. No cenário de praia aberta (condições fronteira de extrapolação das condições vizinhas nos dois extremos da grelha) o trecho apresenta um ganho máximo de área, que depois decresce no tempo. Para os outros dois cenários de condições fronteira, em que a fronteira Norte é fechada, o trecho aumenta sucessivamente o ganho de área no tempo (Figura 4.11c). Este comportamento pode ser justificado pelo recuo da linha de costa, que no cenário de não ser realizada a operação de alimentação artificial, se verifica ser mais acentuado neste trecho nos cenários de fronteira fechada a Norte (Figura 4.14). Para a onda de 4 m de altura o trecho apresenta um comportamento idêntico para os três casos de condições fronteira, sendo que, apresenta um benefício máximo que depois diminui no tempo, em todos os cenários modelados (Figura 4.11d). A diferença observada para o impacto que a alimentação artificial de sedimentos provoca no trecho 8 entre as alturas de onda de 3 e 4 m, quando a fronteira a Norte é fechada, pode ser justificada pelo clima de agitação mais energético, que mais rapidamente transporta os sedimentos para trechos mais a sotamar.

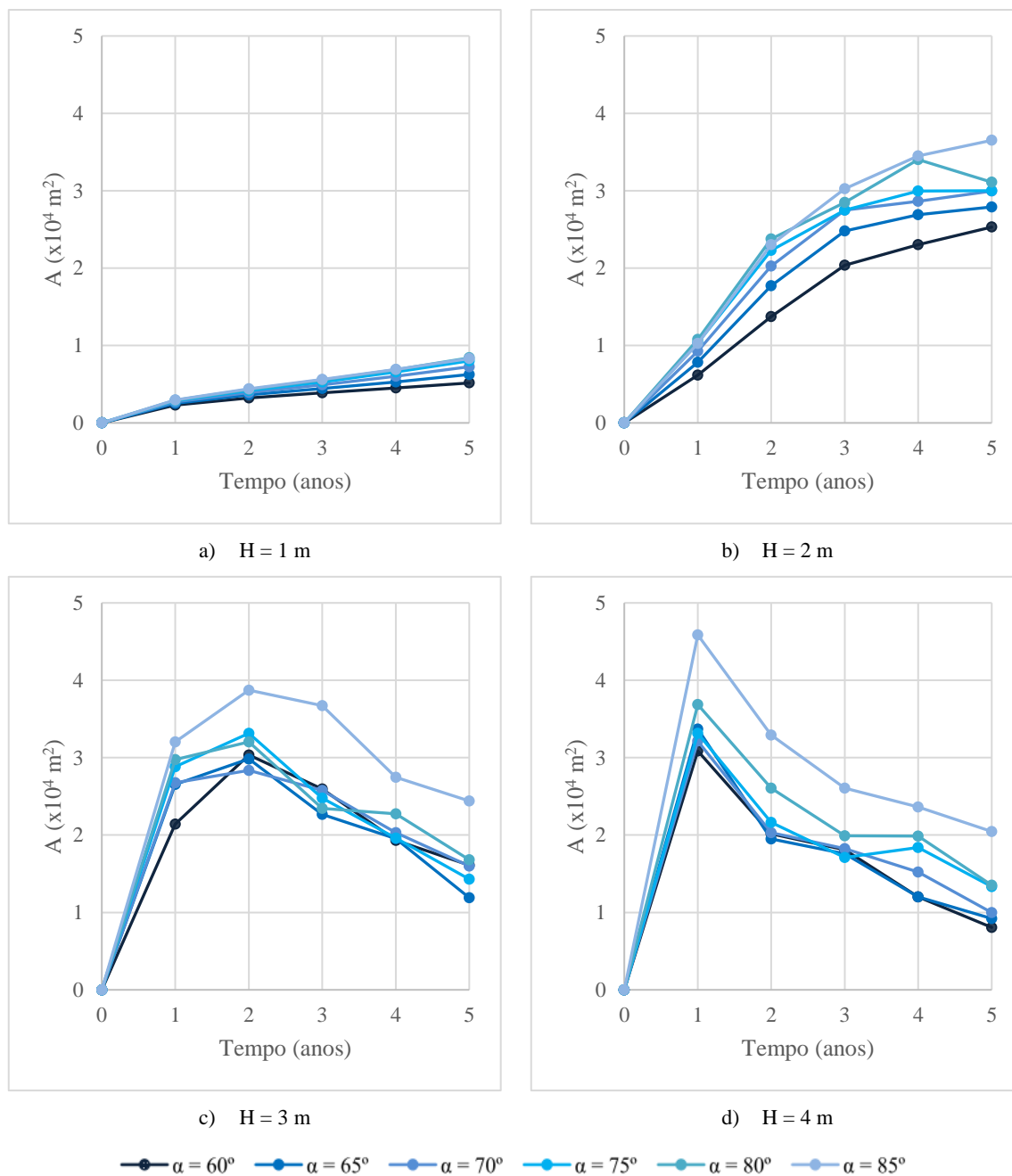


Figura 4.10 - Área ganha no trecho 10, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.

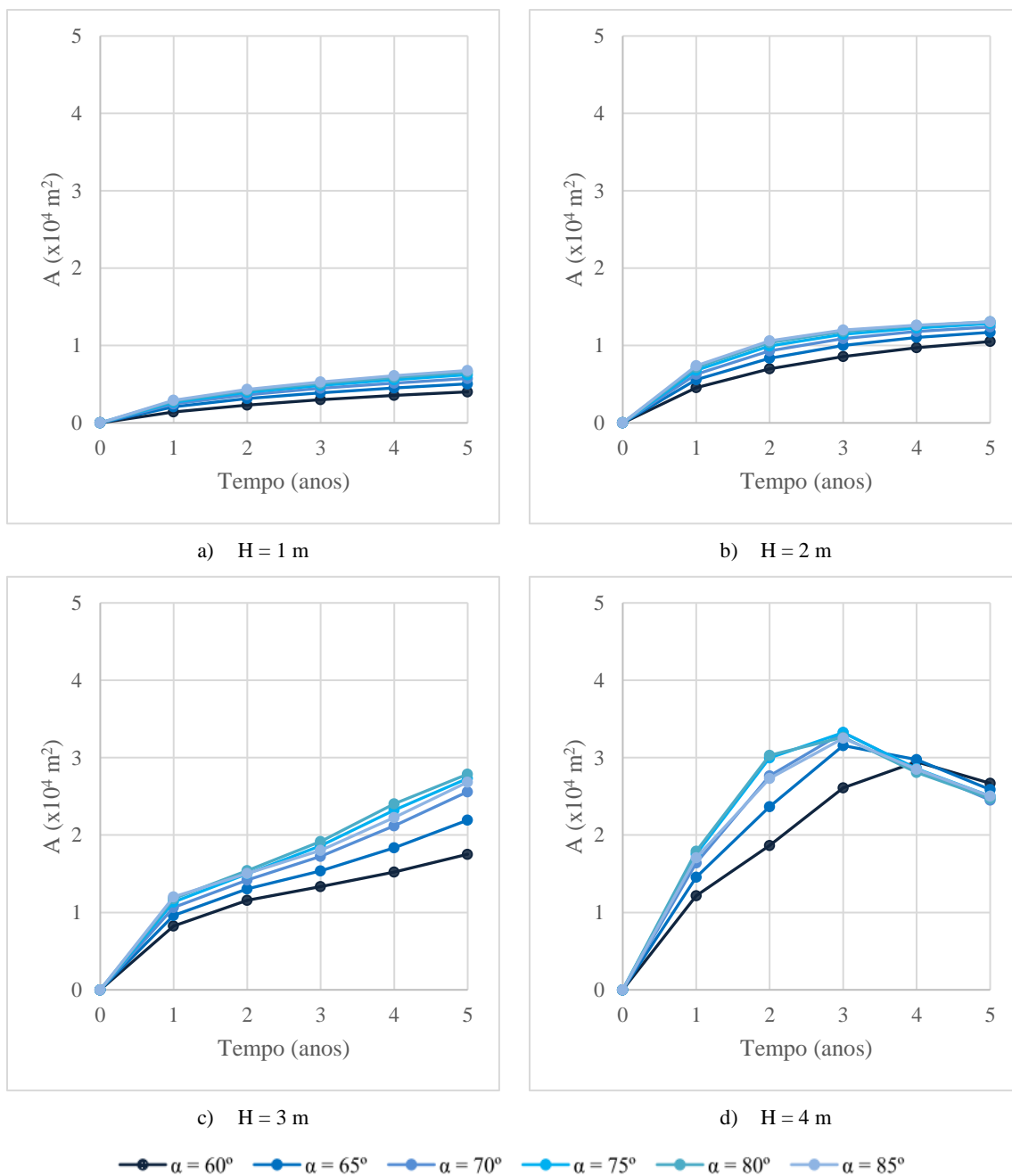


Figura 4.11 - Área ganha no trecho 8, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.

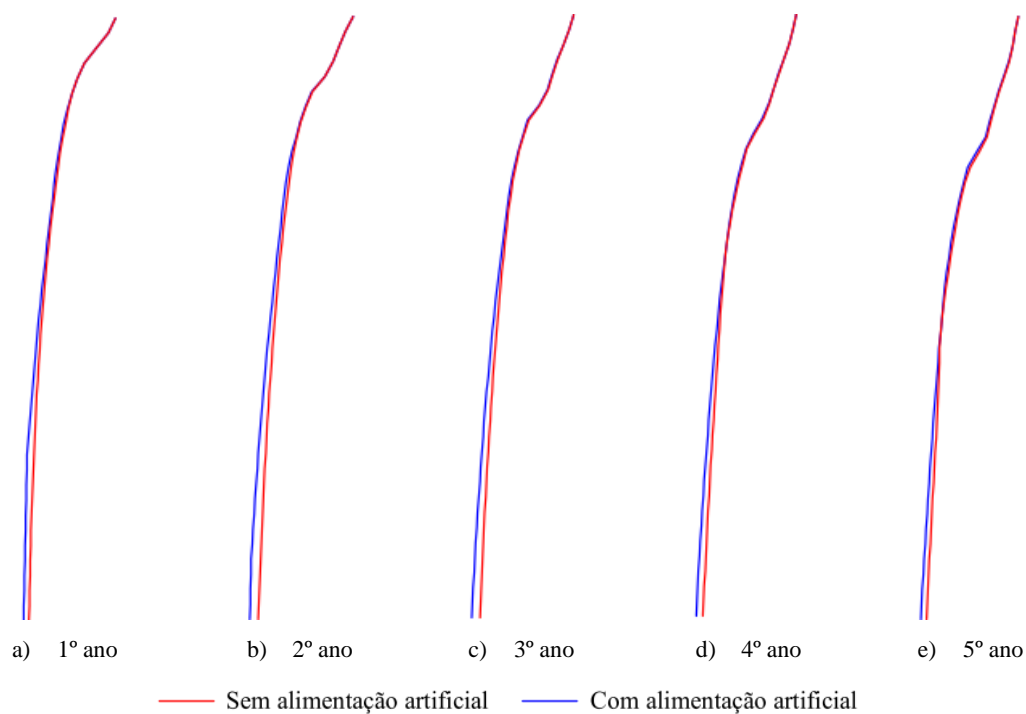


Figura 4.12 - Posição das linhas de costa no trecho 10 em diferentes tempos de simulação ($H = 3 \text{ m}$; $\alpha = 60^\circ$; Fec/Fec).

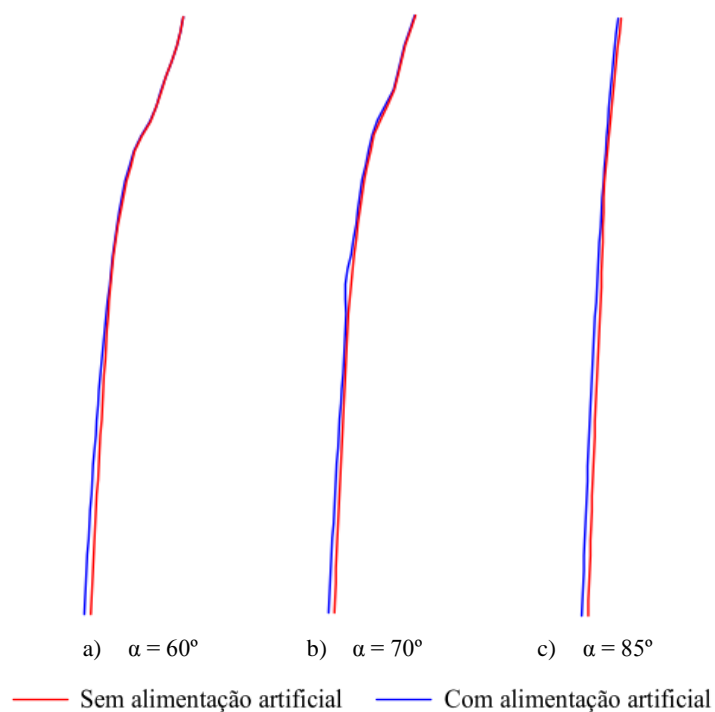


Figura 4.13 - Posição das linhas de costa em planta no trecho 10 para diferentes rumos de proveniência da agitação ($H = 3 \text{ m}$; Fec/Fec; 4º ano de simulação)

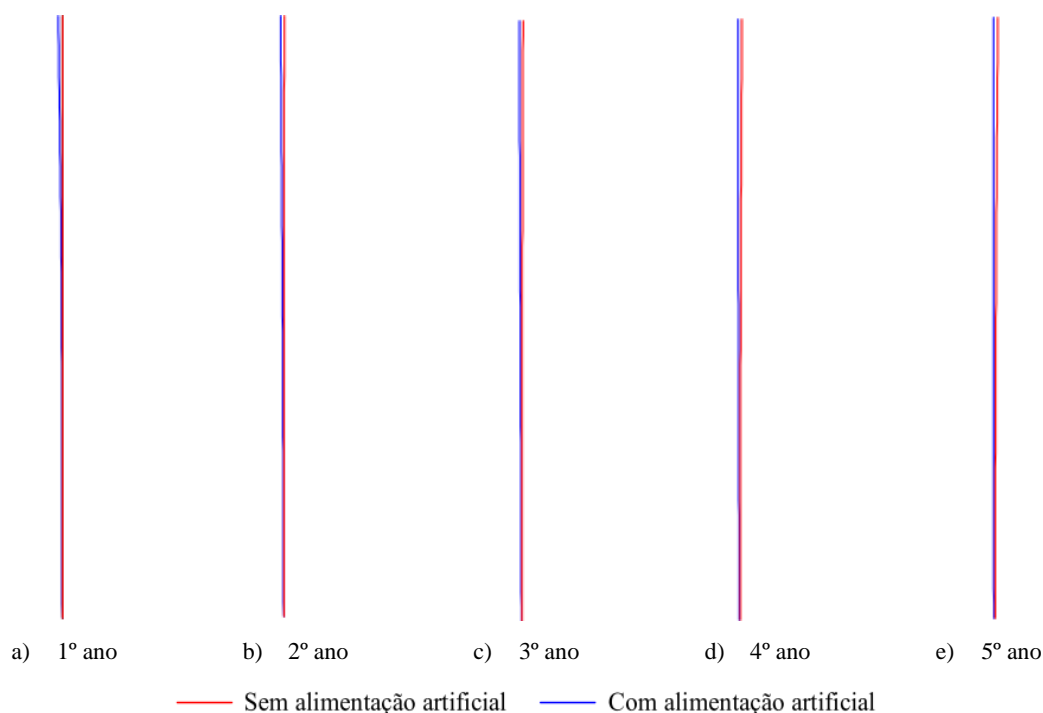


Figura 4.14 - Posição das linhas de costa no trecho 8 em diferentes tempos de simulação ($H = 3$ m; $\alpha = 60^\circ$; Fec/Fec).

No trecho 9, trecho onde foi realizada a alimentação artificial, verifica-se a perda de volumes no tempo para todos os cenários modelados, após ser atingido um volume máximo no 1º ano de simulação. Os volumes que se mantêm no trecho são menores para as maiores alturas de onda e rumos de agitação mais próximos da perpendicular à linha de costa, sendo que, a esse comportamento também se associa o facto dos trechos mais a Sul sentirem o efeito da alimentação mais cedo, uma vez que, além das condições fronteira, é neste trecho que se localiza a única fonte de sedimentos considerada nas modelações.

Em termos de área em planta, o impacto que a alimentação artificial provoca no trecho 9 apresenta um comportamento de perda no tempo de índole qualitativa idêntico ao que ocorre para os volumes, na maioria dos cenários modelados. Na Figura 4.15 ilustra-se este comportamento para uma praia encaixada (Fec/Fec). A exceção observada para o comportamento de perda de área no tempo no trecho 9 refere-se à altura de onda de 2 m para as condições fronteira em que a fronteira a Norte está fechada. Nesse caso, o trecho apresenta uma área mínima, mas começa a recuperar a área perdida com o tempo (Figura 4.15b). A recuperação de área que se observa acontecer no trecho 9, para a altura de onda de 2 m e alguns dos rumos de proveniência das ondas pode estar relacionado com a forma como a linha de costa evolui no trecho 10, em função do rumo de proveniência da agitação. Assim, o

facto do trecho 10 apresentar sucessivamente ganho de território no tempo, para a altura de onda de 2 m, e em maior grandeza para os rumos de proveniência da agitação mais próximos da perpendicular da linha de costa condiciona a forma como a linha de costa evolui no trecho 9 (Figura 4.16).

Da análise da Figura 4.15b verifica-se que para o rumo de proveniência da agitação de 60° não ocorre essa recuperação de área. Esta constatação vai de encontro à justificação da evolução da área em planta no trecho 9 ser influenciada pela evolução que ocorre no trecho 10, uma vez que, se verificada que no trecho 10 o ganho de área em planta é menor para as orientações da agitação mais afastadas da perpendicular à linha de costa. Assim, o ganho de área no trecho 10 para o rumo de proveniência da agitação de 60° não é suficiente para condicionar a evolução de área no trecho 9.

Para a altura de onda de 1 m não se observa a recuperação de área no trecho 9 que acontece para a altura de onda de 2 m (Figura 4.15a). Neste caso, esta observação pode estar relacionada com o facto de, para o clima de agitação de 1 m, o trecho 10 apresentar um impacto da alimentação artificial de sedimentos em termos de área significativamente menor ao que ocorre para a altura de onda de 2 m. Por isso, a forma como a linha de costa evolui no trecho 9 não é tão condicionada pela evolução que ocorre no trecho 10.

Da análise da Figura 4.15 observa-se que o valor máximo de área não ocorre para todos os cenários de agitação no 1º ano de simulação, o que também pode estar associado à forma como a evolução da linha de costa no trecho 10 influencia a evolução no trecho 9. Os resultados correspondem a menores áreas no caso de praias abertas (Ext/Ext). Isto pode-se justificar pelo facto de se observar que a linha de costa, no cenário de não ser realizada alimentação artificial de sedimentos, apresentar-se neste trecho mais recuada em direção a terra quando a fronteira a Norte é definida como fechada e portanto, o impacto da alimentação artificial de sedimentos é mais significativo.

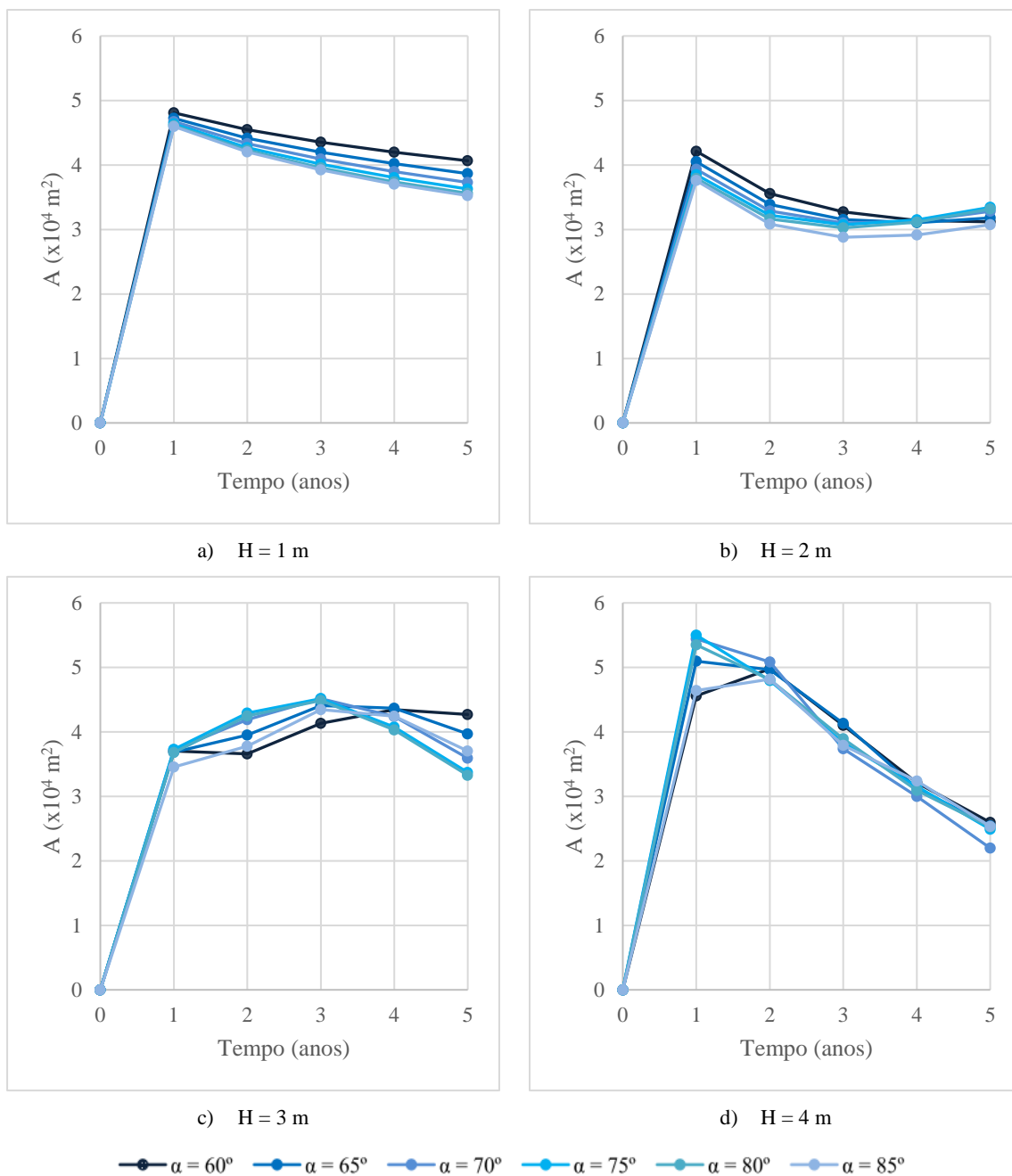


Figura 4.15 - Área ganha no trecho 9, em função do tempo, para os diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira Fec/Fec.

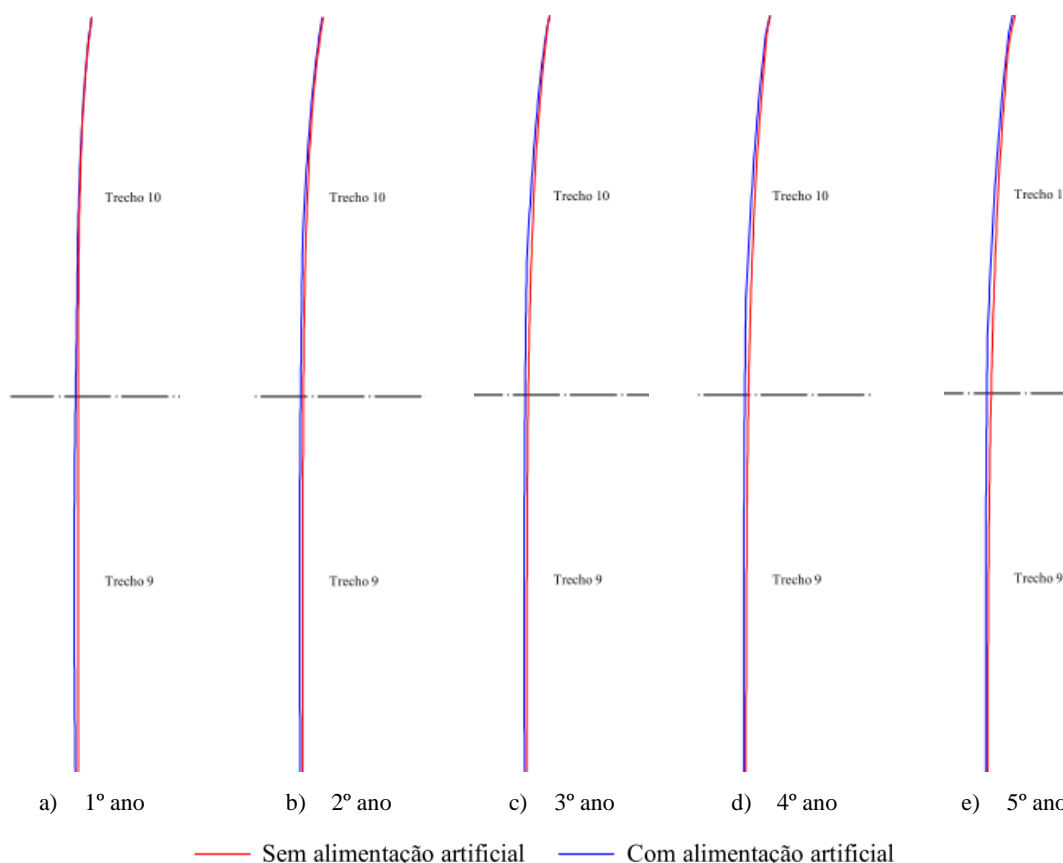


Figura 4.16 - Posição da evolução das linhas de costa nos trechos 9 e 10 em diferentes tempos de simulação ($H = 2$ m; $\alpha = 85^\circ$; Fec/Fec).

4.5 Sumário

Na sequência dos resultados apresentados, verifica-se que realização da alimentação artificial produz um efeito benéfico, quer em termos de volume, quer em termos de área em planta, na região em análise.

A distribuição espacial e temporal dos sedimentos é função das condições de agitação marítima (altura e rumo de proveniência da agitação) e do tipo de praia em que é realizada a alimentação artificial. Os trechos mais a Sul da região modelada começam a receber sedimentos mais cedo e em maior grandeza para as maiores alturas de onda e para os rumos de agitação mais próximos da perpendicular à linha de costa.

A existência ou não de trocas sedimentares com o exterior, combinada com as características da agitação, condiciona a distribuição dos sedimentos. Na zona Norte, quando não existem trocas sedimentares com o exterior (fronteira fechada) a alimentação artificial produz

benefícios nos volumes e ganhos de área em planta, verificando-se que a alimentação tenta contrariar o recuo da linha de costa que existe quando a fronteira Norte está fechada. Em praias abertas o impacto da alimentação reflete-se sobretudo no aumento da robustez dos perfis transversais.

A evolução dos benefícios que a alimentação artificial induz na região modelada permite constatar que os sedimentos vão sendo distribuídos pela região modelada com o tempo, sendo que, é possível antecipar que em alguns trechos o efeito benéfico da alimentação tenderá a desaparecer.

Capítulo 5

**VELOCIDADE DE TRANSPORTE DA
ALIMENTAÇÃO**

5 VELOCIDADE DE TRANSPORTE DA ALIMENTAÇÃO

Na presente secção é exposta a análise dos resultados obtidos para as posições do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos ao longo do tempo e respetivas velocidades de deslocamento. Esta avaliação pretende contribuir para a compreensão de como ocorre a distribuição dos sedimentos na zona costeira e perceber a velocidade temporal da sua evolução espacial.

5.1 Centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos

A presente subsecção destina-se à análise dos resultados obtidos para a posição do centro de gravidade da alimentação artificial, em função das características da agitação marítima e condições fronteira da grelha modelada. Na Tabela 5.1 são apresentadas as posições ocupadas pelo centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo. A análise geral dos resultados permite concluir que os centros de gravidade da alimentação artificial ocupam maioritariamente posições próximas do local da intervenção, junto ao extremo Norte da região de estudo (trechos 8 e 9). No entanto, também se registam situações pontuais em que o centro de gravidade se localiza no trecho 7. Para as ondas de 1 e 2 m de altura, independentemente do rumo de proveniência das ondas e das condições fronteira da grelha modelada, os centros de gravidade da alimentação localizam-se sempre no trecho 9. Com o aumento da altura de onda, o centro de gravidade atinge posições mais a Sul, verificando-se que para a onda de 3 m de altura o centro de gravidade ocupa posições entre o trecho 9 e 8 e para a onda de 4 m chega a localizar-se no trecho 7. Na Tabela 5.1 as células sombreadas a azul e a laranja referem-se às posições do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no trecho 8 e 7, respetivamente.

Em geral, o centro de gravidade da massa de sedimentos vai-se deslocando no sentido Norte-Sul, ao longo do tempo. Contudo, pontualmente verifica-se para as condições de fronteira fechada nos dois extremos a ocorrência de um comportamento mais aleatório, constatando-se que para alguns cenários de agitação o centro de gravidade num determinado instante ocupa uma posição localizada a Norte da posição que ocupava no instante anterior. Este comportamento pode ser justificável pelo facto da fronteira Sul da grelha modelada ser

fechada, o que implica que não ocorram trocas sedimentares com o exterior. A forma como evolui a linha de costa ao longo do tempo pode fazer com que o centro de gravidade ocupe posições mais a Norte num instante mais avançado.

Tabela 5.1 - Posição ocupada (km) pelo centro de gravidade da alimentação artificial. Valores no tempo, em função das características da agitação marítima e das condições fronteira dos extremos da grelha modelada.

H (m)	α (graus)	Ext/Ext					Fec/Ext					Fec/Fec				
		Tempo (anos)					Tempo (anos)					Tempo (anos)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	60	17.00	17.00	17.00	17.00	17.02	17.00	17.00	17.00	17.01	17.02	17.00	17.00	17.00	17.01	17.02
	65	17.00	17.00	17.01	17.01	17.02	17.00	17.00	17.01	17.01	17.02	17.00	17.00	17.01	17.01	17.02
	70	17.00	17.00	17.01	17.01	17.01	17.00	17.00	17.01	17.01	17.02	17.00	17.00	17.01	17.01	17.02
	75	17.00	17.00	17.00	17.01	17.01	17.00	17.00	17.01	17.01	17.01	17.00	17.00	17.01	17.01	17.01
	80	17.00	17.00	17.00	17.01	17.01	17.00	17.00	17.00	17.00	17.01	17.00	17.00	17.00	17.00	17.01
	85	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.01	17.00	17.00	17.00	17.00	17.01
2	60	17.01	17.05	17.05	17.04	17.02	17.01	17.06	17.02	17.01	16.98	17.01	17.06	17.03	17.01	16.98
	65	17.02	17.03	17.02	16.98	16.94	17.02	17.03	17.00	16.96	16.88	17.02	17.03	17.00	16.96	16.88
	70	17.01	17.02	16.99	16.94	16.87	17.01	17.02	16.98	16.92	16.79	17.01	17.01	16.98	16.92	16.79
	75	17.01	17.01	16.97	16.89	16.80	17.01	17.01	16.96	16.89	16.75	17.01	17.01	16.96	16.89	16.75
	80	17.01	17.00	16.95	16.85	16.75	17.01	17.00	16.94	16.87	16.77	17.01	17.00	16.94	16.87	16.77
	85	17.00	16.99	16.93	16.83	16.72	17.00	17.00	16.96	16.87	16.81	17.00	17.00	16.96	16.87	16.81
3	60	17.05	16.98	16.83	16.67	16.48	17.04	16.89	16.66	16.32	15.85	17.04	16.94	16.66	16.32	15.85
	65	17.02	16.89	16.66	16.41	16.17	17.02	16.79	16.51	16.16	15.45	17.02	16.79	16.52	16.16	15.46
	70	17.00	16.79	16.49	16.19	15.90	16.99	16.73	16.43	16.05	15.90	16.99	16.73	16.43	16.10	16.75
	75	16.98	16.72	16.36	16.02	15.70	16.97	16.63	16.26	15.99	15.44	16.97	16.63	16.26	15.93	15.97
	80	16.97	16.66	16.27	15.89	15.54	16.97	16.62	16.25	15.94	15.53	16.97	16.62	16.25	15.95	15.53
	85	16.96	16.62	16.21	15.82	15.47	16.99	16.74	16.40	16.07	15.69	16.99	16.74	16.40	16.07	15.68
4	60	16.99	16.63	16.21	15.80	15.44	16.89	16.27	16.15	15.54	15.22	16.89	16.27	16.14	15.16	16.08
	65	16.91	16.37	15.80	15.31	14.87	16.80	16.08	15.74	15.25	14.94	16.80	16.07	15.42	16.50	13.36
	70	16.84	16.14	15.47	14.89	14.35	16.69	15.89	15.48	14.98	14.56	16.68	15.73	16.54	14.38	15.35
	75	16.78	15.96	15.22	14.58	14.01	16.66	15.90	15.28	15.15	14.46	16.66	15.73	16.24	15.89	15.92
	80	16.73	15.85	15.07	14.01	13.81	16.69	15.89	15.33	14.84	14.43	16.69	15.89	15.33	14.82	13.72
	85	16.71	15.77	14.96	14.29	13.69	16.82	16.01	15.40	15.02	14.62	16.82	15.99	15.38	14.97	14.57

Para as condições fronteira de extrapolação com as condições vizinhas, nos dois extremos da grelha modelada, os resultados apresentados na Tabela 5.1 permitem verificar que, fixando-se uma altura de onda, o centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos ocupa posições mais a Sul da região em estudo quando o rumo de proveniência das ondas é

mais próximo da perpendicular à linha de costa. Isto pode ser justificado pelo facto dos trechos mais a Sul receberem sedimentos mais cedo quando o rumo de proveniência da agitação é mais próximo da perpendicular à linha de costa.

Para os outros dois casos de condições fronteira analisados este facto já não se verifica sempre, sendo que, isto pode estar associado à forma como a linha de costa evolui nos extremos da grelha modelada. Quando a fronteira está fechada verifica-se que a linha de costa apresenta uma configuração extrema junto aos limites da área modelada, ou seja, mais recuada quando há erosão a Norte e mais avançada, quando há acreção a Sul. A forma como os sedimentos são distribuídos é condicionada pela fronteira e consequentemente, a posição ocupada pelo centro de gravidade da alimentação. Como exemplo, na Figura 5.1 ilustra-se a configuração da linha de costa em planta nos extremos da grelha modelada, quando os dois extremos da grelha modelada estão fechados. A figura representa um cenário de altura de onda de 2 m, no 5º ano de simulação, considerando alimentação artificial de sedimentos e vários rumos de proveniência da agitação.

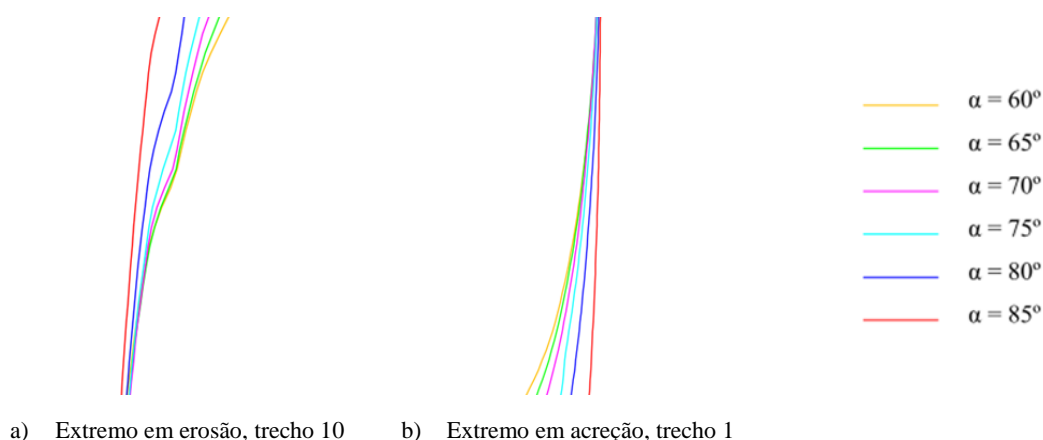


Figura 5.1 - Evolução das linhas de costa nos extremos da grelha modelada no caso dos extremos estarem sujeitos a fronteira fechada, em função do rumo de proveniência da agitação marítima ($H = 2$ m; 5º ano de simulação).

5.2 Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos

Foram determinados dois valores de velocidades: a velocidade de deslocamento do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos, em intervalos de tempo de um ano, v_1 , v_2 , v_3 , e v_4 ; e a velocidade média de transporte dos sedimentos no tempo total de simulação, $\overline{v_G}$. A primeira velocidade resulta da posição ocupada pelo centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos entre o 1º e o 2º ano definida como v_1 , a segunda velocidade entre o 2º e o 3º ano, v_2 , a terceira entre o 3º e o 4º ano, v_3 , e a quarta entre o 4º e o 5º ano, v_4 .

Os valores das velocidades de transporte dos sedimentos no tempo, em função das condições de agitação marítima e condições fronteira da grelha modelada são apresentados na Tabela 5.2. Os resultados permitem verificar que aliado ao aumento da altura de onda se regista a ocorrência dos maiores valores de velocidade. No entanto, fixando-se uma altura de onda, não é possível obter tendências de comportamento para as velocidades em função do rumo de proveniência da agitação.

Na Tabela 5.2 encontram-se assinaladas, para cada altura de onda, a maior (azul) e a menor (laranja) velocidade. A análise desses dois valores permite verificar que não existe uma proporcionalidade entre as alturas de onda e as velocidades médias de transporte no tempo, tendo-se desta forma uma maior discrepância entre valores para as velocidades com o aumento da altura de onda. Também se verifica que, com exceção da onda de 3 m de altura, os dois valores ocorrem para as mesmas condições fronteira dos extremos da grelha modelada, mas rumos de proveniência da agitação marítima diferentes. Assim, constata-se que os rumos de 65º e 75º são os que estão associados à ocorrência dos maiores valores de velocidades e os de 60º, 70º e 75º associados aos menores valores de velocidades.

Tabela 5.2 - Velocidade (m/ano) do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo, em função das condições de agitação marítima e condições dos extremos da grelha modelada.

H (m)	α (graus)	Ext/Ext				Fec/Ext				Fec/Fec			
		v1	v2	v3	v4	v1	v2	v3	v4	v1	v2	v3	v4
1	60	0	1	8	9	0	3	7	9	3	1	7	9
	65	0	5	2	11	0	6	5	8	0	6	5	8
	70	1	5	5	2	2	5	4	5	2	5	4	5
	75	2	2	7	2	3	2	6	1	3	2	6	1
	80	1	3	3	1	1	3	1	1	1	3	1	1
	85	0	1	1	0	0	2	2	2	0	2	2	2
2	60	38	1	11	20	43	31	14	35	43	23	20	28
	65	16	11	37	47	16	34	39	78	16	34	38	76
	70	7	29	52	71	5	37	58	133	1	33	58	133
	75	1	44	74	96	1	50	72	141	1	50	73	141
	80	8	54	92	104	1	60	78	99	1	60	78	99
	85	13	60	99	108	2	37	91	67	3	36	91	67
3	60	66	147	169	189	159	223	344	465	107	274	346	467
	65	137	229	247	237	226	281	348	711	226	267	363	701
	70	205	304	301	292	269	295	381	152	269	299	328	649
	75	266	354	339	321	339	365	271	550	339	365	327	35
	80	311	390	379	349	347	370	316	411	347	377	302	420
	85	339	408	392	346	244	340	330	380	244	340	337	385
4	60	363	424	401	361	621	120	607	318	621	131	974	915
	65	545	561	490	442	718	335	495	307	721	657	1078	3136
	70	697	663	589	535	806	408	502	420	947	809	2162	967
	75	815	738	642	573	760	622	127	685	928	505	344	30
	80	885	775	1061	200	798	565	490	406	806	555	507	1104
	85	937	808	676	594	809	607	383	396	823	609	416	398

Na sequência dos resultados expostos na Tabela 5.2 observa-se que não é possível generalizar comportamentos para as velocidades registadas no tempo. Na Figura 5.2 expõem-se as velocidades do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo, para as várias alturas de onda e vários ângulos de agitação com a linha de costa, para os três casos de condições fronteira analisados.

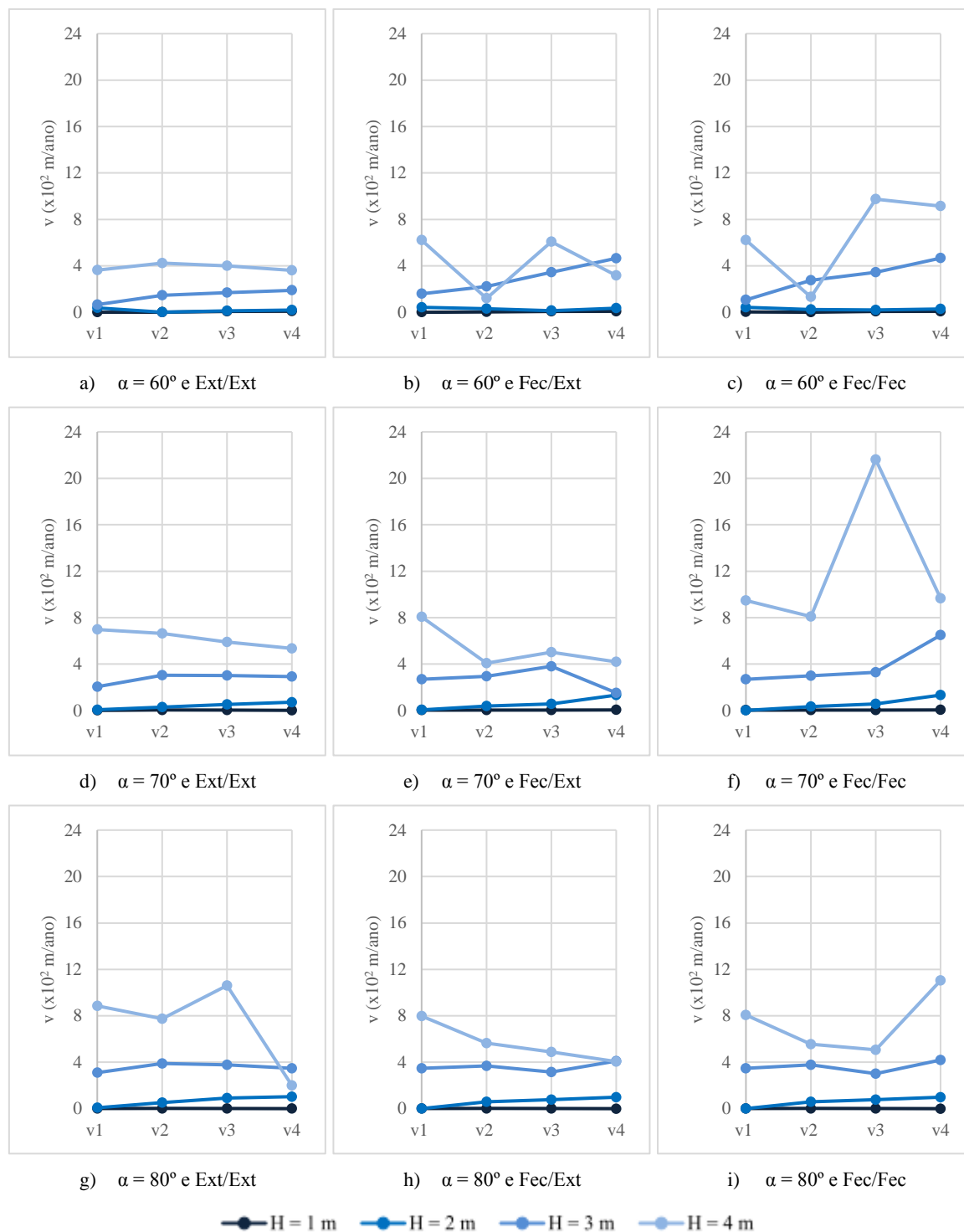


Figura 5.2 - Velocidade do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo, para diferentes cenários de agitação marítima e condições fronteira.

A análise da Figura 5.2 permite verificar que para as menores alturas de onda, 1 e 2 m de altura, os quatro valores de velocidades obtidos, para cada clima de agitação são semelhantes entre si, sendo que, isto se observa para os três casos de condições fronteira analisados.

Para as maiores alturas de onda, os quatro valores de velocidades obtidos apresentam comportamentos variáveis entre si e entre os três casos de condições extremas da grelha modelada. As discrepâncias observadas, por um lado justificam-se com o facto das ondas de maior altura possuírem uma maior capacidade de transporte de sedimentos o que faz com que os sedimentos apresentem um maior grau de dispersão, para o mesmo tempo de simulação. Por outro lado, as discrepâncias observadas, em função das condições fronteira da grelha modelada, poderão estar relacionadas com a forma como os sedimentos são distribuídos ao longo da costa. Assim, a diferença de resultados entre as condições fronteira Ext/Ext e Fec/Ext podem estar associadas ao recuo da linha de costa que se verifica na região Norte, para o caso da fronteira fechada no extremo Norte que, como se viu anteriormente, condiciona o impacto da alimentação artificial na região modelada. As diferenças observadas entre Fec/Ext e Fec/Fec podem estar associadas ao facto de não existirem trocas sedimentares com o exterior no segundo caso, sendo que, se tinha verificado no subcapítulo referente aos centros de gravidade da alimentação artificial de sedimentos, que a não existência de troca de sedimentos com o exterior, para alguns cenários de agitação, fazia com que o centro de gravidade num determinado instante ocupasse uma posição localizada a Norte da posição que ocupava no instante anterior.

Face à dificuldade em observar tendências de comportamento das velocidades médias anuais do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos procedeu-se à análise da média dos quatro valores de velocidade anual obtidos para cada cenário simulado. Na Tabela 5.3 são apresentados esses resultados em função das condições de agitação marítima e das condições fronteira da grelha modelada. Os valores apresentados na Tabela 5.3 permitem analisar a velocidade média do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos no tempo total de simulação. A análise dos valores apresentados permite concluir que as velocidades aumentam com a altura de onda e para a mesma altura de onda, independentemente das condições fronteira da grelha modelada, os valores da velocidade no tempo total de simulação são geralmente da mesma ordem de grandeza.

Estabelecendo-se valores máximos representativos dessas ordens de grandeza para cada altura de onda, pode-se concluir que quando a altura de onda é de 1 m os valores da média das velocidades são iguais ou inferiores a 5 m/ano, para a onda de 2 m de altura, as velocidades são inferiores a 100 m/ano, para a onda de 3 m de altura são inferiores a 500 m/ano e para a onda com altura de 4 m, as velocidades são inferiores a 1500 m/ano.

Os resultados permitem também verificar que para as condições fronteira de extrapolação com as condições vizinhas nos dois extremos da grelha modelada, para o mesmo valor de altura de onda, quanto mais próximo é o rumo de proveniência da agitação à perpendicular da linha de costa, maior é a velocidade. Este comportamento pode-se justificar pelo facto dos sedimentos atingirem os trechos mais a Sul quando o rumo da agitação é mais próximo da perpendicular à linha de costa. Para os outros dois casos de condições fronteira, os rumos de proveniência de 65° a 75° são os que apresentam maiores velocidades, sendo que, este comportamento pode estar relacionado com a forma como a linha de costa evolui nos extremos da grelha modelada quando alguma das condições fronteira da grelha modelada é definida como fechada.

Tabela 5.3 - Velocidade média (m/ano) do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos, no tempo total de simulação.

	Ext/Ext				Fec/Ext				Fec/Fec			
	H (m)				H (m)				H (m)			
α (graus)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
60	5	18	143	387	5	31	297	416	5	29	298	661
65	5	28	212	510	5	41	391	463	5	41	389	1398
70	3	40	275	621	4	58	274	534	4	56	386	1221
75	3	54	320	692	3	66	381	549	3	66	267	452
80	2	64	357	730	1	60	361	565	1	60	362	743
85	1	70	371	754	2	49	323	549	2	49	326	561

5.3 Sumário

Na sequência dos resultados apresentados neste capítulo é possível concluir que a velocidade temporal da evolução espacial dos sedimentos provenientes da alimentação é função das características da agitação marítima e das condições fronteira da grelha modelada. Contudo, é difícil prever tendências de comportamento para a velocidade de transporte da alimentação.

Os resultados obtidos permitem verificar que para os maiores valores de altura de onda ocorrem os maiores valores de velocidade de transporte da alimentação. No entanto, não se verifica existência de proporcionalidade entre o rumo de proveniência da agitação marítima e a velocidade de transporte da alimentação. As condições fronteira dos extremos da grelha

modelada, por condicionaram a forma como os sedimentos são distribuídos, também condicionam a velocidade de transporte da alimentação.

Fixando-se um clima de agitação e condições fronteira da grelha modelada, não se identifica comportamentos padrão na evolução da velocidade de transporte da alimentação.

.

Capítulo 6

APLICAÇÕES À FAIXA COSTEIRA PORTUGUESA

6 APLICAÇÕES À FAIXA COSTEIRA PORTUGUESA

A evolução recente do litoral de Portugal continental relaciona-se com a existência de défices sedimentares significativos, que provocam em alguns troços da orla costeira a existência de riscos elevados de galgamento, inundação e erosão. Para reduzir o risco costeiro uma das principais recomendações do GTL (Grupo de Trabalho do Litoral) é reduzir a erosão por meio da alimentação artificial de sedimentos (Santos *et al.*, 2014a).

No presente capítulo é realizada uma análise qualitativa do impacto da alimentação artificial de sedimentos, como medida de defesa costeira, em três troços da costa ocidental portuguesa: Esmoriz - Furadouro, Barra - Vagueira e Figueira da Foz - Leirosa. Os três troços analisados localizam-se a Sul da Foz do Douro, sendo que, segundo Santos *et al.* (2014b) estes três troços encontram-se inseridos em zonas da faixa costeira que apresentam uma elevada erosão litoral (da ordem de $10^5 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) cujas repercussões se traduzem no aumento do risco costeiro (Figuras 6.1 e 6.2). As causas apontadas para a erosão que acontece nestes troços devem-se à redução da contribuição fluvial do rio Douro e à retenção de sedimentos associada aos portos de Aveiro e da Figueira da Foz (Santos *et al.*, 2014b).



Figura 6.1 - Vista aérea da zona de estudo (Google Earth, 2016).

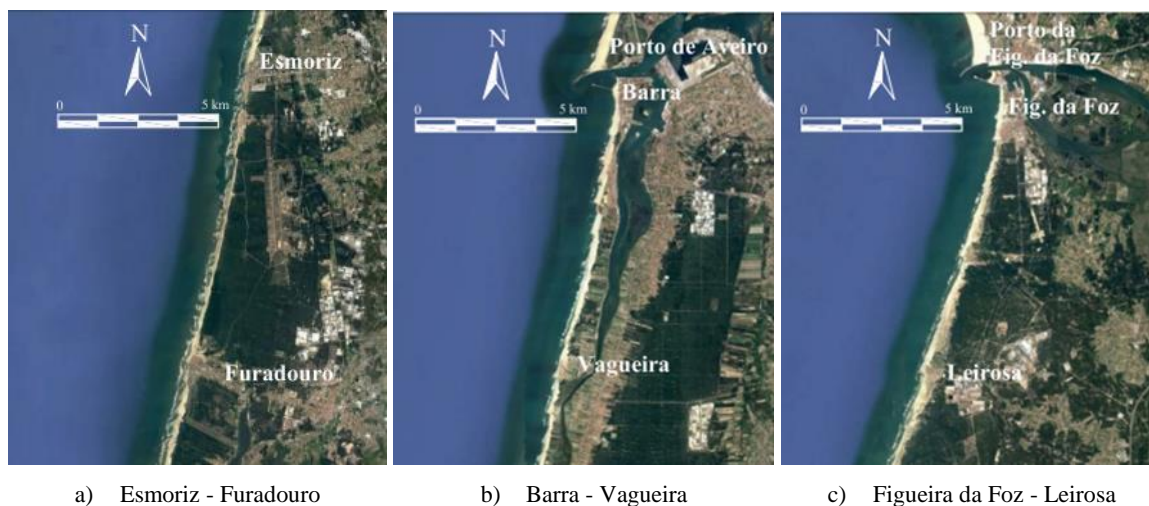


Figura 6.2 - Vista aérea dos troços costeiros analisados (Google Earth, 2016).

Para tentar contrariar a tendência de erosão que ocorre nos três troços costeiros analisados foram construídas numerosas obras de proteção costeira (Santos *et al.*, 2014a). No troço Esmoriz - Furadouro, com uma extensão de aproximadamente 12 km, contabiliza-se a existência de 19 obras de defesa costeira (7 obras perpendiculares à linha de costa e 12 obras longitudinais). Quer a zona de Esmoriz, quer a zona do Furadouro estão entre os casos mais críticos do litoral português em que se verifica ocorrer com frequência uma diminuição da largura das praias situadas em frente das obras de defesa aderente, e em algumas situações, o seu desaparecimento permanente ou na maior parte do ano (Santos *et al.*, 2014a).

O troço Barra - Vagueira apresenta um comprimento de cerca de 9 km. Neste troço existe um total de 17 estruturas de defesa costeira (7 obras perpendiculares à linha de costa e 10 obras longitudinais). O porto de Aveiro define a fronteira a barlar do troço, sendo que, a retenção de sedimentos que ocorre no molhe do porto provoca recuo da linha de costa a sotamar. A zona da Vagueira, à semelhança de Esmoriz e do Furadouro, está entre as zonas do litoral português em que ocorre com frequência a diminuição da largura das praias situadas em frente das obras de defesa aderente (Santos *et al.*, 2014a).

O troço Figueira da Foz - Leirosa tem uma extensão de cerca de 13 km, onde existem 14 obras de defesa costeira (8 obras perpendiculares à linha de costa e 6 obras longitudinais). Neste troço a retenção de sedimentos que ocorre no molhe Norte do porto da Figueira da Foz (fronteira a barlar do troço) induziu ao recuo da linha de costa a sotamar (Santos *et al.*, 2014a).

6.1 Considerações sobre a modelação

O impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia dos três troços costeiros estudados foi analisado para um clima de agitação considerado constante, com altura de onda de 2 m e rumo de proveniência da agitação de 60° com o Norte. O clima de agitação foi escolhido de forma a aproximar-se de uma onda equivalente ao clima de agitação representativo das ondas no litoral de Portugal continental que, segundo Santos *et al.* (2014a), é fortemente influenciado pela ondulação de Noroeste e apresenta uma média anual de altura significativa das ondas de 2 a 2.5 m. As condições fronteira a Norte e a Sul da gelha modelada foram definidas para a situação de extrapolação das condições vizinhas, em todos os troços estudados.

De forma a avaliar-se o impacto da alimentação em cada troço costeiro modelou-se a evolução da linha de costa com e sem alimentação artificial de sedimentos. À semelhança das simulações realizadas no capítulo 3, as modelações nos três troços da faixa costeira portuguesa foram realizadas para um período total de 5 anos, obtendo-se saídas gráficas anuais compatíveis com o objetivo de se prever e analisar a distribuição dos sedimentos ao longo da costa.

As considerações relativas ao nível da superfície livre da água, natureza dos sedimentos e cálculo do potencial do transporte sólido foram iguais às definidas no capítulo 3.

O cálculo da difração que ocorre devido às obras de defesa costeira existentes em cada troço costeiro, e que foram consideradas nas simulações, foi realizado segundo o método de Coelho (2005).

Para o controlo da evolução dos perfis transversais definiu-se o valor do ângulo de atrito dos sedimentos em repouso, o ângulo de atrito dos sedimentos na direção longitudinal, a inclinação mínima do talude submerso, a inclinação mínima do talude emerso e o deslocamento permitido no ponto de fecho do perfil ativo em caso de erosão. O valor do ângulo de atrito dos sedimentos em repouso foi considerado igual a 15 graus e os restantes valores foram assumidos iguais a zero. A razão para neste capítulo ter-se adotado uma forma diferente do realizado no capítulo 3 para o controlo dos perfis transversais prende-se com o resultado de testes preliminares que indicaram melhores desempenhos do modelo para estes ângulos.

Nas modelações em que se considerou a adição artificial de sedimentos, definiu-se uma alimentação única com volume igual a $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ realizada durante dez meses, iniciando-se com o início da modelação. Definiu-se que a alimentação seria realizada no perfil ativo de praia. O perfil ativo foi definido como constante, impondo-se uma profundidade de fecho e limite de espraimento de -15 m (ZH) e +5 m (ZH), respetivamente. Assim, o local de deposição da alimentação foi condicionado pela altimetria de cada trecho costeiro. Na Figura 6.3 representa-se a batimetria/topografia de cada troço costeiro.

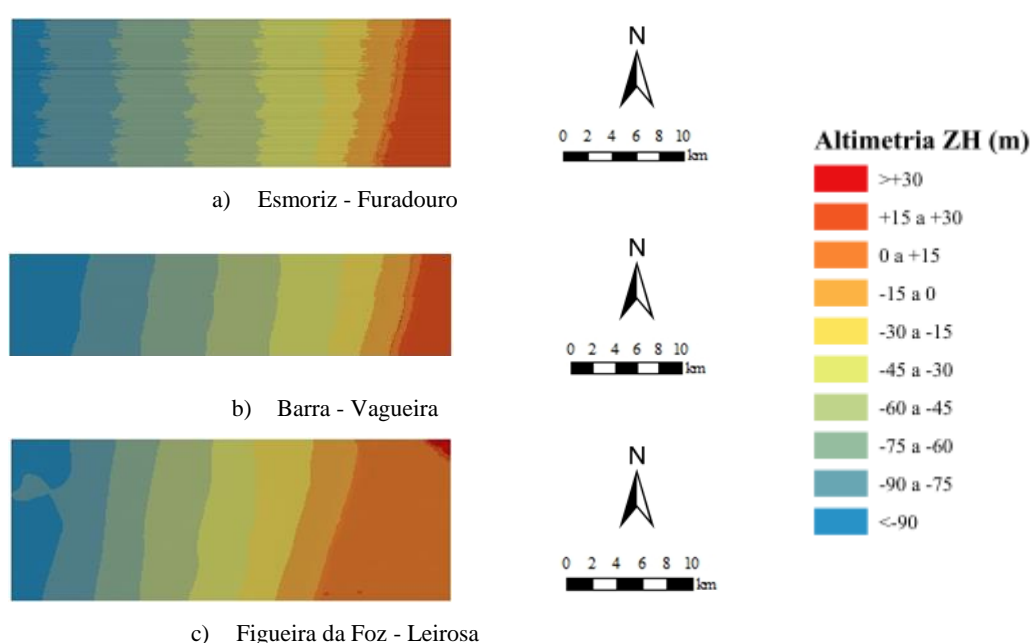


Figura 6.3 - Batimetria/topografia considerada na modelação.

As estruturas de defesa costeira existentes em cada troço costeiro também condicionaram a escolha do local para implantação da alimentação artificial de sedimentos. Na Tabela 6.1 é indicada a área da região modelada de cada troço costeiro e a área de implantação da alimentação artificial. Para simplificar a análise, à semelhança do que foi feito no capítulo 3, a extensão litoral longitudinal foi dividida em vários trechos e para cada trecho foi selecionado um perfil transversal, considerado representativo do trecho ao longo do tempo de simulação. Na Figura 6.4 é representada a divisão em trechos e o local escolhido para a realização da alimentação artificial de sedimentos, para cada troço costeiro analisado.

Tabela 6.1 - Área da região modelada e área de implantação da alimentação artificial de sedimentos em cada troço costeiro.

	Esmoriz - Furadouro	Barra - Vagueira	Figueira da Foz - Leirosa
Área da região modelada (m²)	36500x12300	40000x9200	35000x12825
Área de implantação da alimentação artificial (m²)	2450x2000	2500x2000	2800x1950

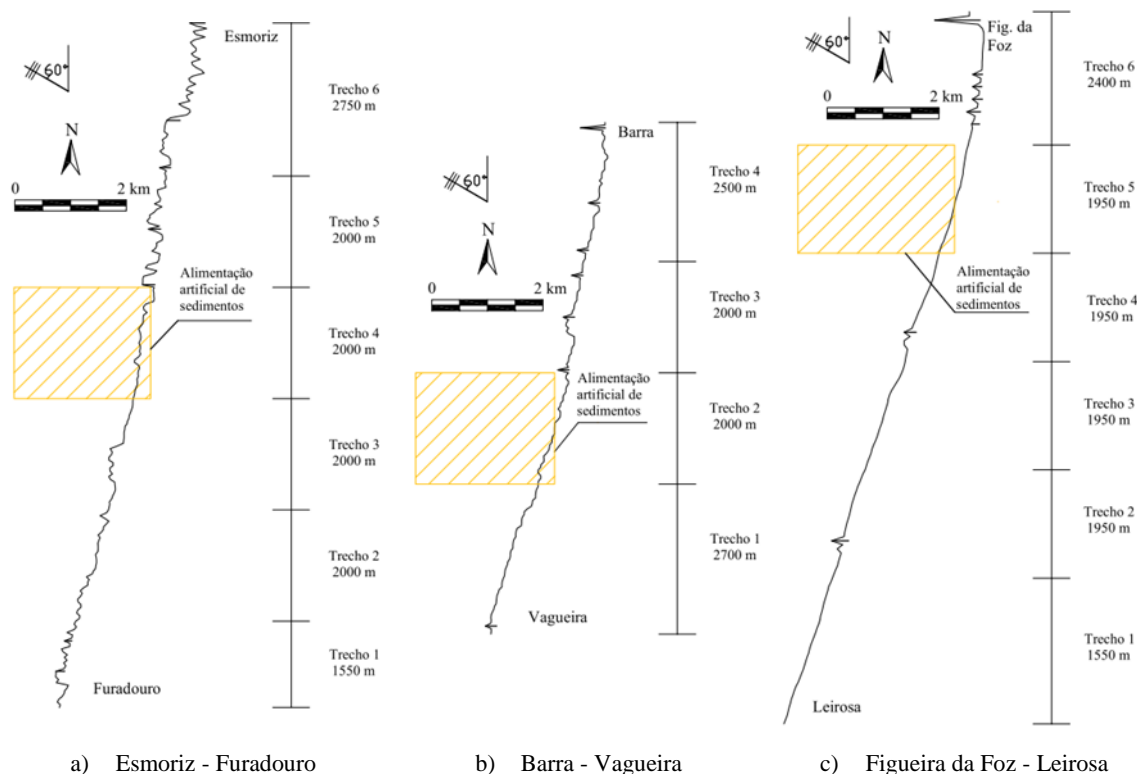


Figura 6.4 - Local de deposição da alimentação artificial de sedimentos.

6.2 Metodologia

No estudo do impacto da alimentação artificial de sedimentos nos troços costeiros Esmoriz - Furadouro, Barra - Vagueira e Figueira da Foz - Leirosa procurou-se perceber como ocorre a distribuição espacial e temporal dos sedimentos induzidos pela alimentação artificial em cada troço costeiro, num período de 5 anos. Assim, para cada troço costeiro avaliou-se a variação da topo-hidrografia e o impacto da alimentação artificial sobre a evolução da linha de costa. As metodologias adotadas para a análise desenvolvida foram as mesmas que as seguidas no capítulo 3.

6.3 Resultados

A análise geral dos resultados obtidos permite verificar que a realização da alimentação artificial de sedimentos provoca alterações morfológicas nos três treços costeiros analisados, provocando impactos benéficos, quer em termos de volume de sedimentos, quer em termos de ganho de área de território. Para os três treços costeiros analisados observa-se que no primeiro ano de simulação o impacto da alimentação é mais significativo no trecho em que foram depositados os sedimentos, mas com o avançar do tempo de simulação o efeito benéfico da alimentação estende-se aos trechos vizinhos (Figuras 6.5 a 6.7).

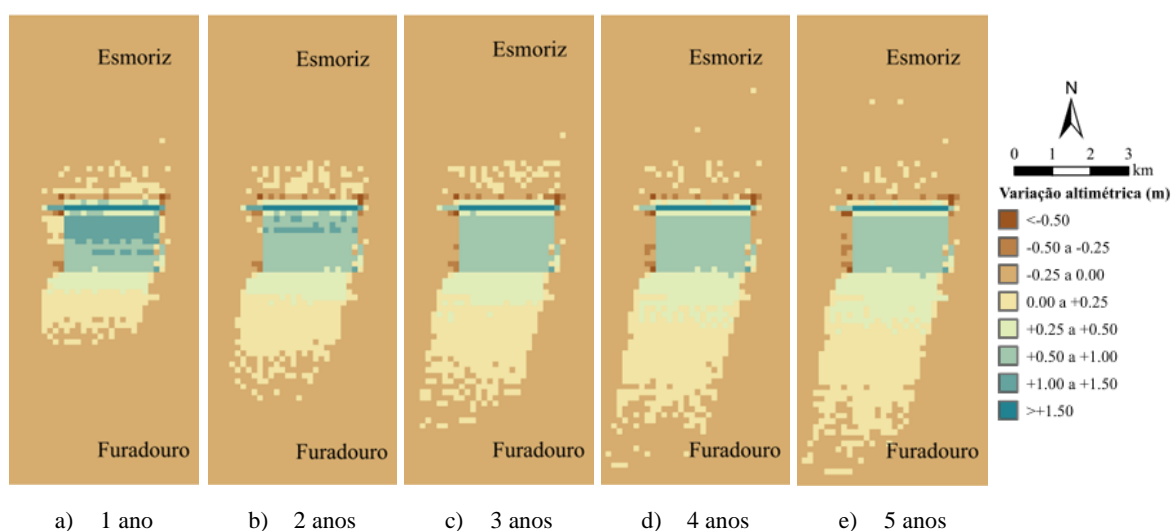


Figura 6.5 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do trecho Esmoriz - Furadouro.

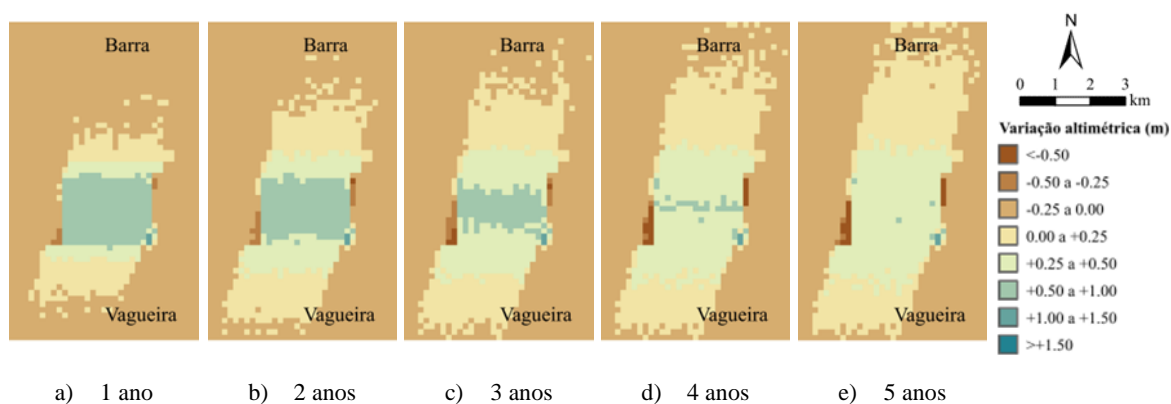


Figura 6.6 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do trecho Barra - Vagueira.

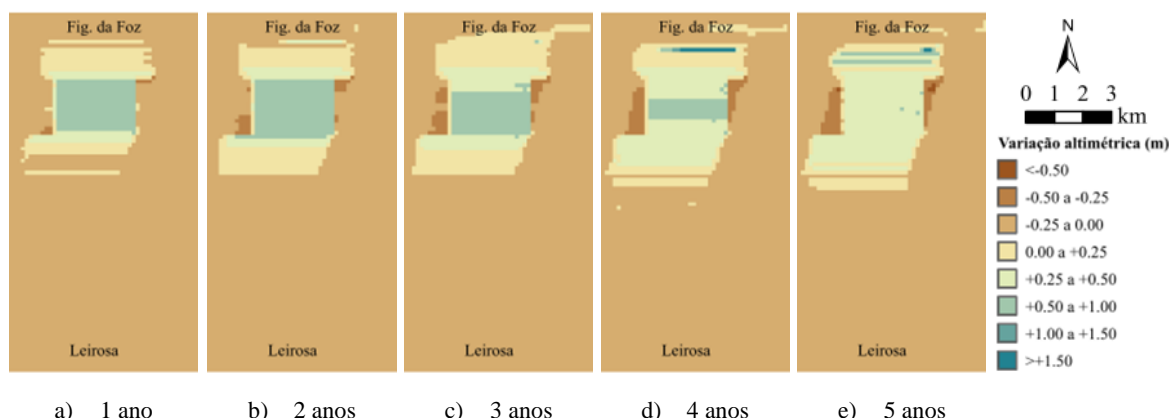


Figura 6.7 - Impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia do troço Figueira da Foz - Leirosa.

Os resultados obtidos indicam que para os três troços costeiros os trechos que apresentam maior impacto da alimentação artificial é o trecho em que é depositada a alimentação artificial e os trechos localizados imediatamente a barlar e a sotamar. No geral observa-se que o efeito da alimentação alonga-se na direção a sotamar, mas também os trechos localizados a barlar apresentam benefícios da adição artificial de sedimentos.

No troço costeiro Esmoriz - Furadouro os trechos que apresentam maior impacto são o trecho 4, trecho onde foi realizada a alimentação artificial, e o trecho 3, trecho localizado a sotamar do local onde foi depositada a alimentação. Também, o trecho 2 apresenta algum impacto, mas de uma ordem de grandeza significativamente inferior quando comparado com o trecho 3. Neste troço costeiro o trecho localizado a barlar não apresenta impacto da alimentação.

No troço Barra - Vagueira todos os trechos apresentam impacto da alimentação artificial. No troço Figueira da Foz - Leirosa o impacto da alimentação artificial é sentido fundamentalmente no trecho onde foi realizada a alimentação artificial, trecho 5, e nos trechos localizados imediatamente a sotamar e barlar, trechos 4 e 6.

Comparando as Figuras 6.5 a 6.7 verifica-se que o efeito da alimentação artificial dilui-se mais lentamente no troço costeiro Esmoriz - Furadouro. A razão para que os sedimentos apresentem uma menor dispersão, para o mesmo tempo de simulação neste troço costeiro, poderá estar associada à batimetria da área de estudo, que no troço Esmoriz - Furadouro é mais irregular que nos outros dois troços analisados (Figura 6.3), fazendo com que o transporte de volumes de sedimentos que resulta da alimentação artificial ocorra de uma

forma mais lenta. As obras de defesa costeira existentes nos três troços costeiros analisados também poderão condicionar o desempenho da alimentação.

Da análise das Figuras 6.5 a 6.7 identificam-se zonas localizadas em que a alimentação induz efeitos negativos. Este comportamento poderá estar relacionado com a área abrangida pela alimentação artificial, uma vez que, isso ocorre em locais em que a adição artificial de sedimentos não completava todo o perfil ativo de praia.

A nível de evolução de volumes e áreas em planta nos trechos em função do tempo, os resultados indicam a ocorrência de dois tipos de comportamento. No trecho em que é realizada a alimentação artificial existe uma tendência de perda no tempo, que se justifica pelo facto de ser nesse trecho que se encontra a única fonte de sedimentos considerada nas simulações. Os restantes trechos em geral apresentam um comportamento de ganho no tempo, quer em termos de volumes, quer em termos de áreas em planta, o que permite concluir que o efeito benéfico da alimentação se mantém no tempo total de simulação, 5 anos (Figuras 6.8 e 6.9). Comparando as Figuras 6.8a, 6.8b e 6.8c observa-se que o impacto da alimentação em termos de área em planta no trecho onde foi realizada a alimentação artificial é significativamente menor no troço Figueira da Foz - Leirosa. A razão para esse impacto ser menor no troço Figueira da Foz - Leirosa poderá estar relacionada com o facto da área de implantação da alimentação artificial ser maior nesse troço (Tabela 6.1). Da análise da Figura 6.9c observa-se que o trecho 6 do troço Figueira da Foz - Leirosa apresenta um ganho importante de volume no último ano de simulação. A causa para este comportamento pode estar relacionada com a condição fronteira a Norte definida na modelação. As várias estruturas de defesa costeira presentes nesse troço também poderão estar a influenciar o comportamento observado.

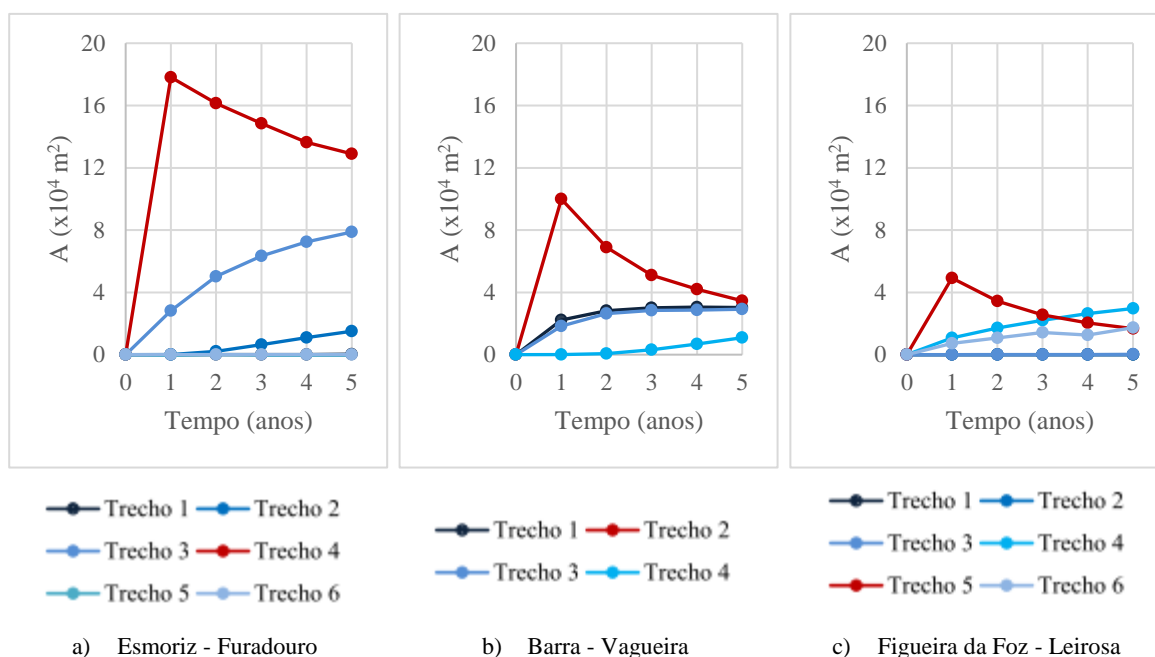


Figura 6.8 - Evolução das áreas em planta no tempo nos troços costeiros analisados.

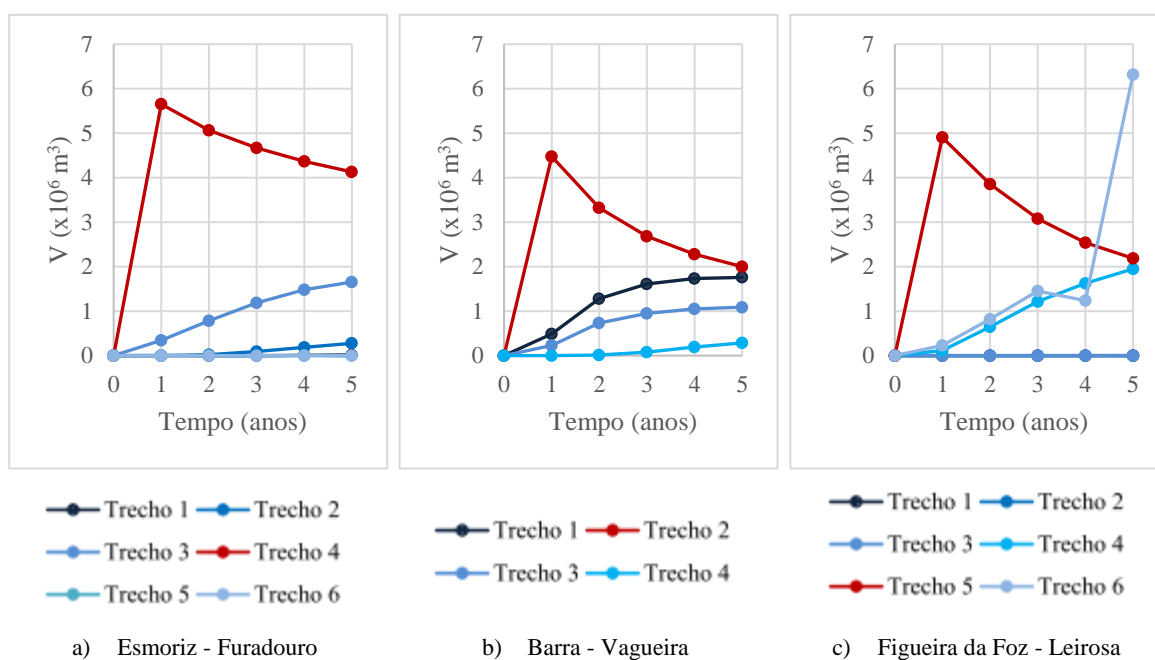


Figura 6.9 - Evolução dos volumes no tempo nos troços costeiros analisados.

Os resultados obtidos no presente capítulo, para a dispersão de sedimentos ao longo da costa em cada troço costeiro, confirmam os apresentados no capítulo 4 para a altura de onda de 2 m e rumo de proveniência da agitação de 75° , correspondente a um ângulo da agitação ao largo somado à orientação da linha de costa portuguesa com o Norte ($\approx 15^\circ$), e condições fronteira de extrapolação com as condições vizinhas nos dois extremos da grelha modelada.

Desta forma, verifica-se que a análise genérica desenvolvida nos diversos cenários modelados pode ser transposta para situações concretas do litoral português, permitindo uma avaliação qualitativa preliminar de comportamentos esperados.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma análise do impacto que a realização de alimentações artificiais de sedimentos provoca na morfologia do litoral. A análise avaliou o efeito da alimentação artificial de sedimentos na configuração da linha de costa e na robustez dos perfis transversais, através do modelo numérico LTC. Foram efetuadas várias simulações, em função de ser ou não realizada a operação de alimentação artificial de sedimentos, para vários climas de agitação e tipo de praia. No presente capítulo é apresentado um resumo do trabalho desenvolvido, destacando-se as principais conclusões obtidas e projetando desenvolvimentos futuros.

7.1 Conclusões

No presente trabalho foram apresentados contributos na identificação do impacto das alimentações artificiais de sedimentos na morfologia do litoral. O conhecimento da evolução da morfologia das zonas costeiras, após serem realizadas alimentações artificiais é fundamental, possibilitando avaliar desempenhos e apoiar o processo decisório na escolha da solução mais adequada, para que a adição artificial de sedimentos combata o défice sedimentar que afeta várias zonas costeiras do mundo.

A alimentação artificial de sedimentos é uma medida de defesa costeira que tem vindo a ser adotada em várias partes do mundo com o principal objetivo de combater défices sedimentares. A dinâmica sedimentar associada aos processos de transporte, que ocorre no local onde é realizada a alimentação artificial, condiciona a forma como os sedimentos são transportados e distribuídos ao longo da costa e consequentemente a morfologia do litoral. O transporte de sedimentos pode-se repartir numa direção longitudinal e outra transversal, sendo a primeira mais importante nas alterações a médio e longo prazo. É fundamental a identificação do perfil ativo para a realização de alimentações, uma vez que, este perfil limita a secção na qual existem alterações significativas na batimetria, com o decorrer do tempo. Sobre o próprio processo de alimentação artificial existem um conjunto de fatores que devem ser estudados e acautelados que condicionam o desempenho da alimentação, nomeadamente

locais de empréstimo de sedimentos, volume da alimentação, forma de colocação, área de implantação e frequência das alimentações.

A modelação numérica é uma útil e importante ferramenta para a gestão das zonas costeiras, podendo contribuir para avaliar o desempenho das operações de alimentação artificial. No entanto, a complexidade dos fenómenos costeiros faz com que os diversos modelos numéricos apresentem vários tipos de limitações. O modelo numérico LTC baseia-se no cálculo do transporte sedimentar longitudinal e na aplicação da equação de continuidade aos volumes de areia movimentados, não sendo sensível aos processos de transporte transversais. Sobre os pressupostos de modelação das alimentações artificiais de sedimentos, o modelo LTC permite considerar diferentes cenários para os fatores associados à operação de alimentação (volume da alimentação, área de implantação, frequência das alimentações e tempo em que é realizada a operação). Do presente estudo conclui-se que para a simulação da alimentação artificial no modelo LTC, é fundamental que o local onde é depositada a alimentação artificial de sedimentos interfira com a zona de rebentação das ondas. Uma vez que, o LTC permite várias formulações para o cálculo do potencial de transporte sólido e a consideração de diferentes cenários para os fatores associados à própria operação de alimentação artificial de sedimentos, foi necessário definir as condições e os cenários a modelar. De forma a obter resultados comparáveis, definiu-se que a alimentação artificial seria realizada sempre com as mesmas características e que a avaliação do potencial de transporte sólido seria realizada segundo a fórmula CERC. A fórmula CERC relaciona o transporte sedimentar com a altura da onda e o rumo de proveniência da agitação.

De todas as ações naturais a que o litoral está sujeito a agitação incidente, caracterizada pela altura de onda e rumo de proveniência, é considerada o principal agente modelador e principal responsável pelo transporte de sedimentos. A determinação de como ocorre a distribuição do volume extra de sedimentos induzido pela alimentação artificial na zona costeira, em função das características da agitação marítima assume especial importância. Os resultados apresentados no capítulo 4 demonstram que a alimentação artificial de sedimentos provoca, de um modo geral, um impacto benéfico na morfologia, atenuando efeitos negativos da erosão sobre a evolução da linha de costa. O volume de sedimentos induzido pela alimentação artificial de sedimentos contraria os défices sedimentares que existam, atenuando o recuo da linha de costa e aumentando a robustez do perfil transversal. Verifica-se que a dispersão dos sedimentos induzidos pela alimentação artificial de

sedimentos aumenta com o aumento da altura de onda, mas essa dispersão também é condicionada pelo rumo de proveniência da agitação. A partir da simulação da alimentação artificial de sedimentos em diferentes tipos de praia observa-se que a existência ou não de trocas sedimentares com o exterior condiciona o impacto da alimentação artificial. Na zona Norte, quando não existem trocas sedimentares com o exterior (fronteira fechada), a alimentação artificial produz benefícios nos volumes e ganhos de área em planta, constatando-se que a realização da alimentação artificial de sedimentos contraria o recuo da linha de costa e aumenta a robustez do perfil transversal. Em praias abertas o efeito da alimentação artificial repercute-se sobretudo a nível do aumento da robustez dos perfis transversais, uma vez que, para este tipo de praias, na situação natural de evolução da linha de costa, assumiu-se que não ocorre a erosão que se verifica ocorrer quando não ocorrem trocas sedimentares com o exterior.

A longevidade das intervenções é um fator importante na avaliação do desempenho da alimentação artificial de sedimentos. O impacto da alimentação artificial vai-se diluindo no tempo, observando-se que o efeito da alimentação estende-se em direção a sotamar, mas também a região localizada a barlar do local onde foi realizada a alimentação artificial apresenta impactos benéficos da adição artificial de sedimentos. A dispersão dos sedimentos ao longo da costa faz com que em algumas zonas da região modelada o efeito da alimentação vá diminuindo no tempo, indicando que o efeito benéfico da alimentação tenderá a desaparecer.

No capítulo 5 tentou-se prever a longevidade da alimentação artificial de sedimentos através da avaliação da velocidade de transporte do centro de gravidade da massa de sedimentos depositada. Verificou-se ser difícil prever e avaliar a velocidade de transporte do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos. Para o tempo de simulação avaliado no presente trabalho (5 anos), os resultados obtidos para a posição do centro de gravidade indicam que o impacto da alimentação faz-se sentir sobretudo na região Norte modelada. O aumento da capacidade energética da agitação marítima provoca uma maior dispersão dos sedimentos ao longo da costa verificando-se que as maiores velocidades do centro de gravidade da alimentação artificial de sedimentos estão associadas às maiores alturas de onda.

Por último, procedeu-se ao estudo do impacto da alimentação artificial em três troços da faixa costeira portuguesa, realçando o impacto benéfico da alimentação artificial de sedimentos na evolução da morfologia do litoral.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Sendo as intervenções de alimentação artificial de sedimentos uma técnica de intervenção de defesa costeira que permite a reposição do balanço sedimentar e estando esta técnica definida como principal estratégia para combater/mitigar a erosão costeira que se verifica acontecer na costa de Portugal continental (GTL), torna-se importante o estudo do seu impacto na morfologia das praias. Portanto, é necessário realizar estudos de modelação de evolução da linha de costa a curto e longo prazo, sendo que, esses estudos poderão servir como referência para futuras intervenções e avaliar a respetiva eficácia.

O volume com que é realizada a alimentação, a área de implantação, o intervalo de tempo em que é realizada a operação, o número e frequência das intervenções são fatores que condicionam o grau de sucesso, desempenho e longevidade das operações de alimentação artificial de sedimentos. Portanto, a realização de alimentações artificiais com as características estipuladas neste trabalho apresenta apenas uma solução possível, estando em aberto outros estudos, com outros volumes, outras áreas e outros intervalos de tempo para a realização da intervenção. Poderá também ser avaliado o impacto da alimentação artificial recorrendo-se a outras formulações de cálculo, nomeadamente para o cálculo do potencial de transporte sólido (por exemplo, através da formulação de Kamphuis).

O tempo de simulação é outro fator que pode vir a ser estudado futuramente, de forma a avaliar-se a longevidade e eficácia da adição artificial de sedimentos num horizonte temporal superior a 5 anos.

Outro possível estudo a realizar consiste na avaliação do desempenho da operação de alimentação artificial de sedimentos na presença de obras de defesa costeira, nomeadamente esporões e quebramares destacados.

A modelação numérica é uma importante ferramenta que permite avaliar a evolução dos sistemas costeiros e o impacto de medidas de mitigação ou adaptação ao problema de erosão.

No entanto, devido à complexidade que estes fenómenos apresentam, a capacidade dos modelos numéricos em traduzirem os processos físicos é ainda limitada pelo que se torna necessário realizar ensaios em modelo físico e comparar os resultados obtidos pelos dois modelos (físico e numérico). O modelo utilizado, apesar de possibilitar uma aproximação à previsão da evolução a situações reais, ainda apresenta algumas lacunas na representação dos comportamentos que podem vir a ser melhoradas futuramente.

Seria importante utilizar outros modelos numéricos que permitam simular a adição artificial de sedimentos de forma a comparar-se desempenhos entre modelos. A comparação dos resultados obtidos numericamente com resultados de monitorização a intervenções de alimentação artificial, também seria um importante estudo a realizar, de forma a verificar a capacidade do modelo numérico na simulação da operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes - Carmo, J. (2016). “Processos Físicos e Modelos Computacionais em Engenharia Costeira”; ISBN 978-989-26-1152-5; Imprensa da Universidade de Coimbra; 452 p.

ArcGIS 10.3 Help Library (2016). Help library for the ArcGIS system for GIS professionals, developers and administrators.

Bodegon, M. J. (2004). “Beach Nourishment: An evaluation of equilibration design methods. Cancún Beach Rehabilitation Project”; Tese de Mestrado, Delft University of Technology, 149 p.

CERC (1984a). “Shore Protection Manual, Vol. 1”; DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research Center, U.S. Government Printing Office.

CERC (1984b). “Shore Protection Manual, Vol. 2”; DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research Center, U.S. Government Printing Office.

Coelho, C. (2005). “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 404 p.

Dabees, M. A., Kamphuis, J. W. (1997). “Numerical Modeling and Coastal Processes: Overview of a Modeling System for Simulating Shoreline Change”. In: Canadian Coastal Conference '97, Guelph, Canada, pp. 161-167 (citado em Silva, 2010).

Dean, R. G. (2002). “Beach Nourishment Theory and Practice”; Advanced Series on Ocean Engineering”; Vol. 18, World Scientific, Singapore, 403 p.

De Vriend, H.J., Van Koningsveld, M. (2012). “Building with Nature: Thinking, acting and interacting differently”; EcoShape, Building with Nature, Dordrecht, The Netherlands, 39 p.

Dias, J. (2005). “Evolução da Zona Costeira Portuguesa: Forçamentos Antrópicos e Naturais”; Revista Encontros Científicos. Número 1, pp. 7-27.

Ecoshape (2015). Visitado em Novembro de 2015.

<http://www.ecoshape.nl/delfland-sand-engine.html>

Google Earth (2016). Visitado em Agosto de 2016.

[http:// earth.google.com/](http://earth.google.com/)

Gravens, M., Elbersole, B., Walton, T., Wise, R. (2008). “Beach Fill Design. Coastal Engineering Manual, Part V: Coastal Project Planning and Design”; Chapter 4, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113 p.

Hanson, H., Kraus, N. C. (1989). “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change”; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p. (citado em Coelho, 2005).

Hearon, G., Ledersdorf, C., Gadd, P. (2002). “California Beach Restoration Study, Part II: Beach Nourishment”; Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, Sacramento, California, 7 p.

Housley, J. (1996). “Justification for beach nourishment”; 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, 7 p.

ICSA (2015). Irmãos Cavaco S. A., visitado em Novembro de 2015.

http://www.icsa.pt/client/skins/a_negocio.asp?cat=24

Kamphuis, J. W. (1991). “Alongshore Sediment Transport rate”; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 624-641 (citado em Kamphuis, 2000).

Kamphuis, J. W. (2000). “Introduction to Coastal Engineering and Management”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16, World Scientific, Singapore, 437 p.

Lacasta, N. (2016). “Litoral XXI – Governança e Programa de Ação”; Agência Portuguesa do Ambiente, Vagos, 29 p.

Martins, H., Veloso Gomes, F. (2011). “Alimentação Artificial de Praias em Ambientes Energéticos Intermédios”; 6.^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, pp 29-42.

NOAA (2015). National Oceanic and Atmospheric Administration, visitado em Novembro de 2015.

<http://oceanservice.noaa.gov/facts/dredging.html>

Paixão, G. (1998). “Planeamento e Gestão de Dragagens Portuárias (Um breve Estudo no Âmbito da DGPNTM-Portugal”); Seminário Sobre Dragagens, Dragados e Ambientes Costeiros, Associação Eurocast-Portugal, pp 7-20 (citado em Coelho, 2005).

Plecha, S., Silva, P., Oliveira, A., Dias, J. (2011). “Sediment Transport Modelling and Morphological Trends at a Tidal Inlet, Sediment Transport in Aquatic Environments”; Dr. Andrew Manning (Ed.), ISBN: 978-953-307-586-0, InTech, DOI: 10.5772/2422, pp. 163-186.

Rodrigues, L. (2010). “Gestão de Sedimentos na Zona Costeira – Alimentações Artificiais”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 97 p.

Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R. (2014a). “Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança”; Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral; 237 p.

Santos, F., Lopes, A., Moniz, G., Ramos, L., Taborda, R. (2014b). “Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança”; Sumário executivo e Recomendações - Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral; 21 p.

Silva, R. (2010). “Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa”; Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 488 p.

SlideShare (2015). Visitado em Novembro de 2015.

<http://www.slideshare.net/priaanchal/flood-management>

Thomas, R. C., Frey A. E. (2013). “Shoreline Change Modeling Using Online Models: General Model Comparison and Literature Review”; Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note No. 55, U.S. Army Corps of Engineers, 9 p.

Tondello, M., Ruol, P., Sclavo, M., Capobianco, M. (1998). “Model tests for evaluating beach nourishment performance”; 26th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 14 p.

Van Heuvel T. (2011). “Climate of Coastal Cooperation, Part III – 3-3-2: Sand Nourishment: A flexible and resilient, adaptive coastal defense measure”; Coastal & Marine Union, Leiden, The Netherlands, pp. 164- 166.

Veloso Gomes, F. (2007). “A Gestão da Zona Costeira Portuguesa”; Revista de Gestão Costeira Integrada, pp 83-95.

Verhagen, H. (1992). “Method for Artificial Beach Nourishment”; 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, 12 p.

Vicente, C. M., Clímaco, M. (2003). “Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico”; Informação Técnica Hidráulica ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 167 p. (citado em Coelho, 2005).

ANEXOS

ANEXOS

Nas páginas seguintes é apresentado o impacto da alimentação artificial de sedimentos na morfologia da região modelada para todos os cenários simulados.

